



HAL
open science

Architecture et modélisation structure-fonction des espèces agroforestière indigènes de Côte d'Ivoire

Beda Innocent Adji

► **To cite this version:**

Beda Innocent Adji. Architecture et modélisation structure-fonction des espèces agroforestière indigènes de Côte d'Ivoire. Sciences agricoles. Université Jean Lorougnon Guede, 2022. Français. NNT: . tel-04148625

HAL Id: tel-04148625

<https://hal.inrae.fr/tel-04148625>

Submitted on 7 Jul 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE

UFR AGROFORESTERIE

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique

ANNEE : 2021-2022

N° D'ORDRE

.....67.....

CANDIDAT

Nom : ADJI

Prénoms : BEDA

INNOCENT

THESE DE DOCTORAT

Mention : Agriculture et Foresterie Tropicale

Spécialité : Génétique et Amélioration des Plantes

Architecture et modélisation structure-fonction des espèces agroforestières indigènes de Côte d'Ivoire : cas de *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. (Meliaceae), *Pterocarpus erinaceus* Poir. (Fabaceae) et *Parkia biglobosa*, Jack, R. Br. (Fabaceae)

JURY

- Président : M. BARIMA Yao Sadaïou Sabas, Professeur Titulaire, Université Jean LOROUGNON GUEDE, Côte d'Ivoire
- Directeur : M. AKAFFOU Doffou Sélastique, Professeur Titulaire, Université Jean LOROUGNON GUEDE, Côte d'Ivoire
- Co-Directeur : Mme. SABATIER Sylvie Annabel, Directeur de Recherches, Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), France
- Rapporteur : M. KOUAME Djaha, Maître de Conférences, Université Jean LOROUGNON GUEDE, Côte d'Ivoire
- Examineurs : M. CILAS Christian, Directeur de Recherches, Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), France
- Mme. TONESSIA Dolou Charlotte, Maître de Conférences, Université Jean LOROUGNON GUEDE, Côte d'Ivoire

Soutenue publiquement

le : 21 / 12 / 2022

TABLE DES MATIERES	Pages
DEDICACES	VII
AVANT-PROPOS.....	VII
REMERCIEMENTS	IX
LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABREVIATIONS	XI
GLOSSAIRE DE TERMINOLOGIE EN ARCHITECTURE VEGETALE	XII
LISTE DES TABLEAUX	XV
LISTE DES ANNEXES	XXII
INTRODUCTION.....	1
PREMIERE PARTIE : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	7
Chapitre 1 : Généralités sur le Caïlcédrat (<i>Khaya senegalensis</i>), le bois de Vène (<i>Pterocarpus erinaceus</i>) et le Néré (<i>Parkia biglobosa</i>).....	8
1.1. Généralités sur <i>Khaya senegalensis</i> (Desr.) A.Juss. (Meliaceae)	8
1.1.1. Position taxonomique.....	8
1.1.2. Description botanique	8
1.1.3. Répartition géographique et écologie	10
1.1.4. Usages	11
1.1.5. Ressources génétiques.....	12
1.2. Généralités sur <i>Pterocarpus erinaceus</i> Poir (Fabaceae).....	12
1.2.1. Position taxonomique.....	13
1.2.2. Description botanique	13
1.2.3. Répartition géographique et écologie	15
1.2.4. Usages	15
1.2.5. Ressources génétiques.....	16
1.3. Généralités sur <i>Parkia biglobosa</i> (Jacq.) R.Br (Fabaceae).....	17
1.3.1. Position taxonomique.....	17
1.3.2. Description botanique	17

1.3.3. Répartition géographique et écologique	19
1.3.4. Usages	20
1.3.5. Ressources génétiques.....	21
Chapitre 2 : Généralités sur les concepts en architecture des plantes vasculaires	22
2.1. Concepts et définition de l'architecture des plantes vasculaires	22
2.2. Le modèle architectural.....	22
2.3. Unité architecturale.....	25
2.4. La réitération	26
2.5. Critères utilisés dans l'analyse architecturale	28
2.6. Niveaux d'organisation.....	31
2.7. Gradients morphogénétiques.....	32
Chapitre 3 : concept, présentation et calibration avec le modèle GreenLab	34
3.1. Modélisation des plantes.....	34
3.1.1. Concept et définition.....	34
3.1.2. Les types de modèles de plantes.....	35
3.2. Concept et présentation du modèle GreenLab	37
3.2.1. Fonctionnement du modèle GreenLab.....	38
3.2.1.1. Fonctionnement des méristèmes.....	38
3.2.1.2. Paramètres de développement	44
3.2.1.3. Paramètres de croissance	47
3.2.1.4. Equations de la dynamique de croissance et de la demande totale de la plante	48
3.2.1.5. Relations entre les dimensions des organes et la quantité de matière végétale	51
3.2.1.5.1. Organes sources	51
3.2.1.5.2. Organe puit et forme des fonctions puits.....	51
3.2.1.6. Simulation de l'architecture des plantes.....	53
3.2.1.7. Séries organiques	54
DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES	55

Chapitre 4 : Site d'étude	56
Chapitre 5 : Matériel	59
5.1. Matériel végétal	59
5.2. Matériel technique	59
Chapitre 6 : Méthodes	60
6.1. Germination et croissance des plantules	60
6.1.1. Récolte et catégorisation des graines	60
6.1.2. Mise en place des essais et ensemencement.....	60
6.1.3. Paramètres de germination évalués.....	61
6.1.4. Etude de la croissance des plantules	62
6.2. Etude architecturale des espèces cibles.....	62
6.2.1. Marqueurs architecturaux.....	62
6.2.1.1. Echantillonnage des arbres	64
6.2.1.2. Choix du type d'axes et de l'habitat.....	65
6.2.2. Unités architecturales et caractéristiques	65
6.3. Modélisation structurelle et fonctionnelle des espèces cibles	66
6.3.1. Modélisation du fonctionnement méristématique et du développement	67
6.3.1.1. Schéma et calibration du modèle de fonctionnement et de développement.....	67
6.3.1.2. Modélisation du fonctionnement des méristèmes.....	67
6.3.1.3. Modélisation du développement.....	68
6.3.2. Modélisation de la croissance.....	70
6.3.2.1. Modèles allométriques	70
6.3.2.2. Schéma et calibration du modèle de croissance	73
6.3.2.3. Paramètres de croissance (source-puits).....	73
6.3.2.3.1. Fonctionnement de l'automate botanique et calcul des paramètres de croissance	74
6.3.3. Simulation de l'architecture	79

6.4. Analyse statistique des données	80
TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION	81
Chapitre 7 : Résultats	82
7.1. Germination, croissance et biomasse des jeunes plants des espèces cibles	82
7.1.1. Variation de la caractéristique des graines semées	82
7.1.2. Germination des graines	86
7.1.2.1. Germination des graines de <i>Khaya senegalensis</i>	86
7.1.2.2. Germination des graines de <i>Pterocarpus erinaceus</i>	88
7.1.2.3. Germination des graines de <i>Parkia biglobosa</i>	90
7.1.3. Croissance et biomasse des jeunes plants de 4 mois	91
7.1.3.1. Croissance et biomasse des semis chez <i>Khaya senegalensis</i> selon la taille des graines et les sites expérimentaux	91
7.1.3.2. Croissance et la biomasse des jeunes plants chez <i>Pterocarpus erinaceus</i> selon la taille de graine et les sites expérimentaux	94
7.1.3.3. Croissance des jeunes plants chez <i>Parkia biglobosa</i> selon la taille de graine et les sites expérimentaux	98
7.2. Développement architectural chez les espèces cibles	101
7.2.1. Caractéristiques des individus	101
7.2.2. Marqueurs primaires de croissance	102
7.2.2.1. Variation globale des marqueurs le long des axes	102
7.2.2.2. Effet de l'habitat sur la morphologie des marqueurs	107
7.2.2.3. Effet de la localité sur la morphologie des marqueurs	108
7.2.2.4. Effet de l'âge des individus sur la morphologie des marqueurs	109
7.2.2.5. Effet des espèces cibles sur la morphologie des marqueurs	110
7.2.3. Diagrammes et caractéristiques architecturales chez les espèces cibles	111
7.2.3.1. Mise en place de l'unité architectural chez <i>Khaya senegalensis</i>	111
7.2.3.2. Mise en place de l'unité architectural chez <i>Pterocarpus erinaceus</i>	116
7.2.3.3. Mise en place de l'unité architecturale chez <i>Parkia biglobosa</i>	121

7.2.3.4. Caractéristiques architecturales chez les espèces cibles	125
7.3. Modélisation structurelle et fonctionnelle des espèces cibles	128
7.3.1. Calibration du modèle de fonctionnement méristématique et du développement des espèces cibles	128
7.3.1.1. Modélisation du fonctionnement des méristèmes	133
7.3.1.1.1. Modélisation du nombre d'unité de croissance par tige	133
7.3.1.1.2. Modélisation du nombre de phytomères par unité de croissance le long des tiges	134
7.3.1.1.3. Modélisation du nombre de phytomère par tige	138
7.3.1.1.4. Modélisation du fonctionnement des méristèmes des branches	141
7.3.1.2. Modélisation du développement	145
7.3.1.2.1. Modélisation de la ramification : plasticité de l'unité de croissance	145
7.3.1.2.2. Paramètres de développement calculés	149
7.3.1.2.2.1. Paramètres du développement calculés au niveau des phytomères	149
7.3.1.2.2.2. Paramètres du développement calculés au niveau de l'UC	154
7.3.1.3. Simulation du développement topologique des espèces cibles à 2 ans	156
7.3.2. Modèles de croissance des espèces cibles	157
7.3.2.1. Modèles allométriques	157
7.3.2.1.2. Biomasse sèche des entrenœuds estimées à partir du volume	158
7.3.2.1.3. Biomasse sèche des feuilles estimée à partir du produit de leurs dimensions	160
7.3.2.1.4. Surface foliaire estimée à partir du produit des dimensions des feuilles	163
7.3.2.2. Calibration du modèle de croissance des espèces cibles	166
7.3.2.2.1. Paramètres obtenus empiriquement (observation) et expérimentalement	166
7.3.2.2.2. Croissance chez les arbres de six (6) mois	166
7.3.2.2.2.1. Expression des paramètres source-puits	167
7.3.2.2.2.2. Simulation de l'architecture des espèces cibles à 6 mois	171
7.3.2.2.3. Croissance chez les arbres de 12 mois	172

7.3.2.2.3.1. Expression des paramètres source-puits	173
7.3.2.2.3.2. Simulation de l'architecture des espèces cibles à 12 mois	176
7.3.2.2.4. Croissance chez les arbres de 2 ans.....	178
7.3.2.2.4.1. Expression des paramètres source-puits cachés.....	178
7.3.2.2.4.1.1. Expression de l'application et de l'insuffisance de la loi de Pressler : l'exemple de <i>Khaya senegalensis</i>	179
7.3.2.2.4.1.2. Correction de la loi de Pressler : l'exemple de <i>Khaya senegalensis</i>	183
7.3.2.2.5. Multi-ajustements des paramètres source et puit des series organiques de 12 et 24 mois chez les espèces cibles.....	187
7.3.2.2.5.1. Simulation de l'architecture des espèces à 24 mois	190
Chapitre 8 : Discussion	192
8.1. Germination et croissance des jeunes plants chez les espèces cibles	192
8.1.1. Germination chez les espèces cibles	192
8.1.2. Croissance et biomasse chez les espèces cibles	194
8.2. Développement architectural chez les espèces cibles.....	195
8.2.1. Variation des marqueurs primaires de croissance	196
8.2.2. Unité architecturale et caractéristiques architecturales des espèces cibles	198
8.3. Modélisation structure-fonction des espèces cibles.....	202
8.3.1. Modélisation du fonctionnement des méristèmes	203
8.3.2. Modélisation du développement des espèces	205
8.3.3. Modélisation de la croissance chez les espèces cibles	206
CONCLUSION, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES	210
REFERENCES.....	217
ANNEXES.....	i
Résumé	a

DEDICACES

A

Ma Mère : *ATSIN Sopia Yvonne*

Mon Père : *ADJI Yapi Auguste*

Mon Père Adoptif : *KOFFI Koffi Benois*

- "Some people feel the rain. Others just get wet." (**Bob Marley**)

- "Listen, we are all robbers, but in the end, we will be judged on two facts:

➤ *Who did we choose to pillage?*

➤ *And what did we do with it?"* (**Martha Graham**)

- "Without theory, there is no valid measurement possible" (**De Reffye Philippe**)

AVANT-PROPOS

Cette thèse dont 50 % des résultats ont été publiés, s'inscrit dans un projet de recherche dénommé « Intégration de trois Essences Forestières Indigènes dans les Systèmes Agroforestiers pour l'amélioration des conditions de vie des populations locales et le maintien de la biodiversité (EFISA) ». Ce projet réunit 7 institutions que sont, l'Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG), le Centre de Coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), à travers l'Unité Mixte de Recherche en Botanique et Modélisation de l'Architecture des Plantes et Végétations l'Unité Mixte de Recherche en (UMR-AMAP), l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), à travers l'Unité Mixte de Recherche en Diversité, Adaptation et Développement des Plantes (UMR-DIADE), le Centre National de Recherche Agronomique (CNRA), le Centre National de Semences Forestières (CNSF), l'Université Nangui Abrogoua et l'Ecole Centrale de Paris (ECP). Il fait partie intégrante du Projet AMRUGE-CI « Appui à la Modernisation et à la Réforme des Universités et Grandes Ecoles de Côte d'Ivoire » du grand projet PRESeD-CI-2 « Partenariat rénové pour la Recherche au Service du Développement de la Côte d'Ivoire » du Contrat de Désendettement et de Développement (C2D Education-Formation, Volet 2 « Renforcement des capacités de la recherche scientifique ») initié par le gouvernement Ivoirien et Français. Nos sincères admirations et sollicitudes vont à l'endroit des 7 institutions ci-dessus pour leur collaboration, ayant permis l'aboutissement de ce travail. Je voudrai très sincèrement et du plus profond du cœur témoigner de ma très grande reconnaissance au Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique de Côte d'Ivoire et à l'Agence Française de Développement (AFD) pour le financement de ce projet et de la mise à disposition de la bourse AMRUGE, pour ma formation et l'analyse de mes données en France.

Ce travail a été effectué à l'Université Jean Lorougnon Guédé (Daloa), à la station de recherche forestière Diabaté Kamonon du CNRA (Korhogo) et à l'Unité Mixte de Recherche AMAP du CIRAD (Montpellier).

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont rendu la réalisation de ce travail possible.

J'exprime ma profonde gratitude à :

- Madame la Présidente de l'Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG), Professeur TIDOU Abiba Sanogo Epouse KONE, le vice-président chargé de la pédagogie, de la recherche, de la vie Universitaire et de l'innovation technologique, Professeur KONE Tidiani, ainsi que le vice président chargé de la planification, de la programmation et des relations extérieures, Professeur AKAFFOU Doffou Sélastique, pour avoir autorisé mon inscription à l'UJLoG ;
- Monsieur le Directeur Général du Centre National de Recherche Agronomique (CNRA), Dr YTE Wongbé, pour avoir autorisé mon accueil au sein de la station de Korhogo et de Lataha ;
- Monsieur le Directeur de l'Unité Mixte de Recherche de Botanique et Modélisation de l'Architecture des Plantes et des végétation (AMAP), Dr FOURCAUD Thierry, pour avoir autorisé mon accueil au sein de son laboratoire et de m'avoir procuré du matériel technique et logistique de travail.

Je suis redevable à Madame la Directrice de l'UFR Agroforesterie, Dr TONESSIA Dolou Charlotte, Maître de Conférences, « Maman » comme j'ai pour habitude de l'appeler. Elle a été la mère protectrice et responsable de la première promotion du parcours Agriculture et foresterie dont je fais partie à l'UJLoG. J'en suis la aujourd'hui en partie grâce à elle. Je voudrai lui témoigner ici, ma profonde reconnaissance pour ses sollicitudes. Je remercie Monsieur le Directeur du Laboratoire d'Amélioration de la Production Agricole (LAPA), Dr AYOLIE Koutoua, Maître de Conférences, pour m'avoir accepté et intégré au sein de son équipe de recherche.

Je ne saurais oublier mes encadrants :

- Professeur AKAFFOU Doffou Sélastique, Professeur titulaire de génétique à l'UJLoG, qui m'a initié et m'a partagé son amour pour les plantes et la conservation de la nature ; Dr SABATIER Sylvie Annabel, Directrice de Recherche au CIRAD de Montpellier qui m'a adopté comme son propre fils ; Dr JAEGER Marc, Directeur de Recherche au CIRAD de Montpellier et Dr CARAGLIO Yves, Ingénieur et Directeur de Recherche au CNRS, à l'INRAE et à l'Université de Montpellier, pour leur disponibilité, assistances, soutien, encouragements, aides de tout genre et conseils tout au long de ce travail.

Je témoigne mon infinie reconnaissance aux coordonnateurs du projet EFISA d'où découle cette thèse :

- Professeur KOUASSI Kouadio Henri, Professeur titulaire à l'UJLoG et Dr DUMINIL Jérôme, Directeur de Recherche à l'IRD de Montpellier pour leur conseils, encouragements et sollicitude.

J'adresse mes plus sincères remerciements au Professeur émérite de l'Université de Montpellier et du CIRAD, Philippe DE REFFYE « Mon grand-père » et à sa femme « Grande mère Catherine » pour m'avoir

accueilli et hébergé chez eux à domicile pour l'analyse de mes données de modélisation. Avec un cœur aimant, grand père « LIP » comme je l'appel est passionné de recherche malgré son âge. Sa passion et son dévouement à la recherche m'ont impressionné et laissé sans voix. Je n'avais jamais pensé qu'à 76 ans, on pouvait encore passer des nuits blanches pour la science. Merci infiniment grand père "LIP", je ne saurais trouver des mots pour qualifier ton aide.

Je remercie le professeur émérite de l'Université de Montpellier, de l'INRAE et du CNRS, HALLE Francis, pour m'avoir fait découvrir cette nouvelle science d'architecture végétale.

Je tiens à remercier tous les techniciens de la serre du CIRAD de Montpellier « campus Lavalette », de la station Diabaté Kamonon du CNRA de Korhogo et des guides en forêt de Toumodi, Bouaké, Katiola, Fronan, Niakara, Kananwolo, Tafiéré, Ferké et Sinématiali en particulier : CHAINE Christian, JONES Steeve Joseph, YEO Housman, YEO Michel, DOGNI Kôrô, YARDJOURA, TENIN, KOUADIO Charles, YEO Donatien, ADAMA Coulibaly, SORO Séidou pour leurs aides physiques, morales et techniques.

J'associe à ses remerciements la directrice de la station du CNRA de Korhogo, Madame DJIDJI Hortence et au chef de programme forêt et environnement du CNRA, Dr BRAHIMA Coulibaly, ainsi que Dr SORO Dognimeton, Maître de Conférences à l'UJLoG, pour avoir facilité mon accueil à Sinématiali son village.

Je remercie, Dr GORE Bi Nestor, Maître de Conférences à l'UJLoG, ainsi que tous les membres de l'équipe de génétique et amélioration des plantes de l'UJLoG, Dr LETORT Veronique Le Chevalier, Maître de Conférences à l'University Paris-Saclay (CentraleSupélec), Dr KANG Mengzhen, Directrice de recherche et chef de Laboratoire du LIAMA de Chine, ainsi que Dr WANG Xiujuan, Maître assistant à l'institut d'automatisation des systèmes complexes de l'académie des sciences de Chine et Dr KOFFI Guillaume, maître de Conférences à l'Université Nangui Abrogoua, pour leurs soutiens, conseils et orientations.

Toute ma gratitude à YAPO Yapi Trésor, KOFFI Oponou Eudes, KONE Miyala Emilienne, SIKA Akaffou Rodrigue, BEUGRE Louise Tatiana, HODEBERT Nathalie, BROHARD Yannick, RENSCH Nora Bakker, DORDEVIC Milena Giroud, AMANI Konan Bienvenu, KONAN Kouassi Arthur, HOUPHOUET Yao Patrice, KONAN Koffi David, DOH Arnold Ruffin, GOMES Ange Gérard, DONGO Kobenan, YAYA Konaté, DIOMANDE Siaka, N'GUESSAN Annette, LITCHE Darius, KOFFI Bérenger, KOUAME Olivier, NOUFOU Adel Akou Rafat, WAWOGNINLIN Coulibaly Brice, ABDEL Sater Ali, MOUGANI Christ, TERCIEUX Camille Girard, MBOUJDA Franca, GALLOIS Gaele, DUBOI Agnès, AFFOUARD Antoine, BADOURDINE Colette, CLEMENT Jeanne, DIONE Léonnie, mes collègues du resto-CROUS de Montpellier, mes compagnons de la bourse AMRUGE et de l'UMR-AMAP pour leur aide, sympathie, soutien moral et physique. J'aimerais que vous trouviez ici l'expression de ma haute considération.

Je voudrais adresser mes remerciements aux rapporteurs de cette thèse ainsi qu'aux membres du jury pour leurs critiques et suggestions qui permettront d'améliorer notre travail.

J'ai une pensée affectueuse et profonde envers ma famille, tous mes amis et proches qui m'ont toujours soutenu et accompagné. La liste est vraiment longue et je ne peux tout citer. Que les uns et les autres trouvent en cette œuvre un grand signe d'admiration, de considération et de reconnaissance.

LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABREVIATIONS

- AMAP** : botanique et Modélisation de l'Architecture des Plantes et des végétations
- AMRUGE-CI** : Appui à la Modernisation et à la Réforme des Universités et Grande Ecole de Côte d'Ivoire
- ANOVA** : Analyse de la Variance (Analysis of Variance)
- CIRAD** : Centre de Coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement
- CITES** : Commerce International des Espèces Sauvages
- CNRA** : Centre National de Recherche Agronomique
- CNRS** : Centre National de Recherche Scientifique
- CTFT-CI** : Centre technique forestier tropical de Côte d'Ivoire (actuel CNRA)
- DBH** : Diameter at Breast Height (Diamètre à hauteur de poitrine)
- DeFo** : Développement des Forêts
- DIADE** : Diversité, Adaptation, Développement des Plantes
- EN** : Entrenoeud
- FAO** : Food and Agriculture Organisation (Organisation pour l'alimentation et l'agriculture)
- GLOUPS** : GreenLab Opérateur Universel des Plantes Simulées
- GLSQR** : Generalized Least Squares (méthode des moindres carrés généralisée)
- INPN** : Inventaire National du Patrimoine Naturel
- INPROBOIS** : Industrie et Promotion du Bois
- INRAE** : Centre National de Recherche en Agronomie et Environnement
- IRD** : Institut de Recherche Pour le Développement
- LAI** : Leaf Area Index
- MNHN** : Muséum National d'Histoire Naturelle de l'unité Patrimoine Naturel (PatriNat) du CNRS
- MOD** : Module de croissance
- MTG** : Multi Tree Scale Graph (Graphe à multi-échelles de l'arbre)
- OFB** : Office Française de la Biodiversité
- OIPR** : Office Ivoirien des Parcs et Réserves
- PA** : Pousse Annuelle
- PROTA** : Plant Resources of Tropical Africa (Ressources végétales de l'Afrique tropicale)
- Q/D** : rapport offre/demande dans le modèle GreenLab
- Redd+** : Réduction des Gaz à Effet de Serre dues à la Déforestation et à la Dégradation des forêts
- SCB** : Société de Culture Bananière
- SODEFOR** : Société de Développement des Forêts
- UC** : Unité de Croissance
- UICN** : Union International de Conservation de la Nature
- UJLoG** : Université Jean Lorougnon Guédé
- UMR** : Unité Mixte de Recherche

GLOSSAIRE DE TERMINOLOGIE EN ARCHITECTURE VEGETALE

Acrotonie : développement préférentiel des axes latéraux au sommet d'une pousse ou à la fin de l'unité de croissance

Amphitonie : lorsque les rameaux sont portés préférentiellement dans un plan horizontal de part et d'autre de l'axe porteur.

Arbre colonial : rien à voir avec une plante envahissante. C'est un arbre ou arbuste qui pratique la réitération tout en gardant son modèle architectural bien visible. La croissance correspond à l'augmentation tridimensionnelle de la colonie, par réitération aérienne et souterraine.

Arbre unitaire : un arbre qui se limite à son modèle architecturale, l'arbre ne réitère pas généralement. Le mécanisme de la réitération peut exister chez lui, mais prend une infime place.

Architecture végétale : la manière dont la plante édifie sa structure à un moment donné de son existence (mode de croissance, ramification, différenciation des axes et position de la sexualité). Cette expression désigne la série des caractères structuraux exprimée par une plante au cours de son développement (ontogénie) mais aussi la méthode d'étude de l'organisation spatio-temporelle de la structure végétale.

Axe agéotrope : lorsque la direction des axes est oblique (mixte entre les directions verticale et horizontale)

Axe orthotrope : lorsque la direction des axes est verticale.

Axe plagiotrope : lorsque la direction des axes est horizontale,

Basitonie : développement privilégié de rameau à la base de l'entité porteuse ou de l'unité de croissance.

Cataphylles : cicatrice d'ébauche foliaire qui protégeait le bourgeon avant le débourrement.

Cime d'un arbre : sommet du houppier.

Croissance continue : des axes qui ne présentent pas de périodicité d'allongement endogène marquée et qui sont dits à croissance continue

Croissance rythmique : des axes qui montrent une périodicité d'allongement endogène marquée.

Développement monopodial : axe édifié par un méristème apical unique ; la croissance d'un axe est assurée de façon indéfinie par le même méristème ou bourgeon apical (mécanisme d'abscission apicale sans sexualité).

Développement sympodial : axe non unique mais un ensemble d'axes (succession d'axe élémentaires à floraison apicale ou terminés par des structures apicales apparentées à des fleurs, épines, vrilles, dômes de parenchyme etc.) ; la construction d'un axe est assurée par une

succession de segments superposés provenant de bourgeons latéraux différents (succession linéaire d'axes élémentaires dont chacun est édifié par un méristème à courte durée de vie).

Diagramme ou unité architecturale : architecture élémentaire très stable d'une plante. Chaque espèce végétale possède un nombre petit et fini de catégories d'axes. L'ensemble de ces catégories aux fonctions précises constituent l'Unité Architecturale de l'espèce.

Epitonie : répartition des rameaux sur la face supérieure des axes et branches.

Fourchaison : formation de deux ou plusieurs axes relais morphologiquement identiques chez un sympode à partir du traumatisme apical d'un axe unique.

Hypopodium : entrenœud très long mis en place dans le cas d'un rameau immédiat, longueur d'entrenœud entre la base du rameau et la première feuille.

Hypotonie : les rameaux avec un grand diamètre sont répartis sur la partie inférieure des branches.

Hypotonie et amphitonie interviennent dans l'extension des branches et peuvent se superposer.

Méristème : zone apicale dans le bourgeon où s'effectue la division cellulaire.

Mesotonie : les rameaux se développent de façon privilégiée dans la zone médiane de l'entité porteuse.

Métarmorphose architecturale : transformation progressive de la structure de l'arbre au cours de sa vie.

Modèle architectural : série d'architectures qui se succèdent dans les conditions écologiques stable et non contraignante, de sa germination à sa floraison et qui résulte de l'expression de son patrimoine génétique. La typologie des modèles architecturaux repose sur l'observation de quatre groupes principaux de caractères morphologiques : la croissance (rythmique ou continue), la ramification (absence ou présence, monopodiale ou sympodiale, rythmique, continue ou diffuse), la direction de croissance des axes et la position de la sexualité. Chaque modèle correspond à une combinaison particulière de ces caractères architecturaux.

Monocyclisme : la pousse annuelle est composée d'une seule unité de croissance.

Néoformation : croissance indéterminée des organes contenus dans un bourgeon

Phyllotaxie : disposition des organes foliaires le long d'un axe. Lorsqu'une seule feuille est portée à chaque nœud, la phyllotaxie est qualifiée d'alterne. Dans ce cas, si les feuilles successives sont positionnées dans un même plan et qu'elles forment deux à deux un angle de 180° , la phyllotaxie est qualifiée d'alterne distique. À l'inverse, si les feuilles sont disposées dans plusieurs directions autour de l'axe selon une spire virtuelle unique, la phyllotaxie est qualifiée d'alterne spiralée. Lorsque plusieurs feuilles sont insérées à un même nœud, la phyllotaxie est qualifiée de verticillée. Un cas particulier de la phyllotaxie verticillée est la phyllotaxie opposée où deux feuilles sont insérées à un même nœud.

Phytomère : ensemble formé par le nœud associé à la (aux) feuille(s), sa (ses) production(s) axillaire(s) et son entre-nœud sous-jacent.

Polycyclisme : la pousse annuelle est composée de 2 ou plusieurs unités de croissance.

Préformation : croissance prédéterminée des organes d'un bourgeon.

Rameau épicornique (gourmand, rejet ou suppléant) : aussi appelé réitérations traumatiques, est un rameau se développant à partir d'un bourgeon latéral dormant sur le tronc ou sur des branches maîtresses ;

Rameaux différés ou à développement différé : phase de dormance (repos) du bourgeon latéral, les rameaux se développent l'année suivant l'allongement de la pousse porteuse.

Rameaux immédiats ou à développement immédiat : croissance sans phase de dormance du bourgeon, les rameaux se développent sur la pousse qui est en train de s'allonger et sont généralement localisés au milieu de cette pousse porteuse.

Ramification : apparition d'une branche sur le tronc et, plus généralement, d'un axe N+1 sur un axe N. Les deux axes, N et N+1, ont le même âge en cas de ramification immédiate ; N+1 est plus jeune que N en cas de ramification retardée. C'est le fait qu'une unité morphologique du corps du végétal donne naissance à une ou plusieurs unités nouvelles de même nature fondamentale qu'elle-même. Le moment de développement d'un rameau latéral est qualifié de différé ou d'immédiat, selon le fait qu'il fait respectivement suite ou non à une phase de repos après l'initiation du méristème latéral par le méristème terminal. Quand tous les méristèmes axillaires d'une tige donnent naissance à un rameau, la ramification est dite continue ; quand les rameaux sont regroupés en étages distincts, la ramification est qualifiée de rythmique ; enfin, lorsque la disposition des rameaux est différente des deux cas précédents, la ramification est qualifiée de diffuse.

Réitération : rejets ou troncs surnuméraires reproduisant le modèle de l'arbre, en raison soit d'un traumatisme soit de conditions écologiques supraoptimales. Processus de duplication d'une structure existante qui concerne une partie de l'UA, par exemple les branches (Réitération partielle) ou l'ensemble de l'UA (Réitération totale). Le complexe réitéré s'établit en même temps que la structure porteuse, (Réitération immédiate) » ou avec un délai de plus de 2 ans par rapport à la structure porteuse (Réitération retardée).

Sympode : Dans la ramification sympodiale ou sympodique méristème terminal de l'axe porteur meurt ou se transforme en une structure qui perd sa faculté de croître végétativement. La poursuite de la croissance est alors assurée par le fonctionnement d'un ou de plusieurs méristèmes latéraux qui édifieront autant d'axes latéraux ou axes relais, et l'ensemble ramifié sera qualifié de sympode. Selon que cette ramification aboutit à la formation d'un, deux ou plus de deux relais, on parlera respectivement de sympode monochasial, dichasial, ou polychasial.

Unité de croissance : portion de tige mise en place au cours d'une période d'allongement ininterrompue.

LISTE DES TABLEAUX

	Pages
Tableau 1 : caractéristiques pédoclimatiques des sites expérimentaux.....	58
Tableau 2 : exemple de fichier cible des fréquences lu par le module Fit_GU.main pour la caractérisation méristématique.....	68
Tableau 3 : exemple d'analyse de cime à partir du choix d'une branche par UC	70
Tableau 4 : tableau de présentation d'un exemple de fichier MTG pour l'extraction des données de croissance dans le logiciel Xplo	76
Tableau 5 : exemple d'organisation d'un fichier de série organique composée en multifitting pour le calcul des paramètres source-puits à 12 et 24 mois.....	78
Tableau 6 : caractéristiques des graines selon différentes classes triées par espèce	83
Tableau 7 : provenances des graines et caractéristiques dendrométriques des semenciers utilisés	85
Tableau 8 : paramètres de vigueur des semis de 4 mois selon la catégorie de graine chez <i>Khaya senegalensis</i>	92
Tableau 9 : biomasses sèches des jeunes plants chez <i>Khaya senegalensis</i>	93
Tableau 10 : paramètres de vigueur des jeunes plants selon le site expérimental chez <i>Khaya senegalensis</i>	93
Tableau 11 : biomasse sèches des jeunes plants chez <i>Khaya senegalensis</i> , selon le site expérimental.....	94
Tableau 12 : paramètres de vigueur des jeunes plants selon la taille de la graine <i>Pterocarpus erinaceus</i>	95
Tableau 13 : biomasse des jeunes plants selon la catégorie de graine chez <i>Pterocarpus erinaceus</i>	96
Tableau 14 : vigueur des jeunes plants selon le site expérimental chez <i>Pterocarpus erinaceus</i>	97
Tableau 15 : influence du site d'étude sur la biomasse des plantules chez <i>Pterocarpus erinaceus</i>	97
Tableau 16 : vigueur des jeunes plants selon la taille des graines chez <i>Parkia biglobosa</i>	98
Tableau 17 : biomasse sèche des jeunes plants selon la catégorie de taille de graine mère chez <i>Parkia biglobosa</i>	99
Tableau 18 : vigueur des jeunes plants selon le site expérimental chez <i>Parkia biglobosa</i>	100
Tableau 19 : biomasse des jeunes plants en fonction du site expérimental chez <i>Parkia biglobosa</i>	101

Tableau 20 : caractéristiques dendrométriques des individus en fonction de l'âge et de l'habitat chez les trois espèces cibles.....	102
Tableau 21 : influence de l'habitats sur la morphologie des marqueurs primaires de croissance.....	108
Tableau 22 : influence de la localité sur la morphologie des marqueurs primaires de croissance	109
Tableau 23 : influence de l'âge des individus sur la morphologie des marqueurs architecturaux	110
Tableau 24 : comparaison des marqueurs primaires de croissance entre <i>Khaya senegalensis</i> , <i>Pterocarpus erinaceus</i> et <i>Parkia biglobosa</i>	111
Tableau 25 : description de la morphologie et des caractères architecturaux des catégorie d'axe chez <i>Khaya senegalensis</i>	114
Tableau 26 : description morphologique des catégories d'axe chez <i>Pterocarpus erinaceus</i>	119
Tableau 27 : description morphologique des catégories d'axes chez <i>Parkia biglobosa</i>	124
Tableau 28 : caractères architecturaux propre à l'espèce <i>Khaya senegalensis</i>	126
Tableau 29 : caractères architecturaux propre à l'espèce <i>Pterocarpus erinaceus</i>	127
Tableau 30 : caractères architecturaux propre à l'espèce <i>Parkia biglobosa</i>	128
Tableau 31 : tableau recapitulatif de la Moyenne, la Variance et les paramètres du processus de Bernoulli des tiges principales à 6, 12 et 24 mois puis des branches à 24 mois par localité et par espèce.	129
Tableau 32 : comparaison du nombre de phytomère par rang d'UC des tiges et banches sur un échantillons de 30 individus de 24 mois chez les espèces cibles par station.....	131
Tableau 33 : Comparaison des paramètres de développement des deux types d'axes considérés et calculés au niveau du phytomère par station.....	153
Tableau 34 : caractéristiques dendrométriques et nombre d'entité échantillonné par catégorie d'axe et par âge chez les espèces cibles.	158
Tableau 35 : paramètres source-puits à 6 mois chez les espèces cibles	170
Tableau 36 : paramètres source-puits chez les espèces cibles à 12 mois	175
Tableau 37 : paramètres source-puits de l'erreur de la loi de <i>Pressler</i> chez <i>Khaya senegalensis</i> à 24 mois.....	181
Tableau 38 : paramètres source-puits des individus de 24 mois chez les espèces cibles	186
Tableau 39 : paramètres source-puits du multi-ajustement des stades 12 et 24 mois chez les espèces cibles	190

LISTE DES FIGURES

	Pages
Figure 1 : photos d'arbre et d'organes chez <i>Khaya senegalensis</i>	9
Figure 2 : carte de répartition du genre <i>Khaya</i> en Afrique	11
Figure 3 : photos d'arbre et d'organes chez <i>Pterocarpus erinaceus</i>	14
Figure 4 : carte d'aire de répartition de l'espèce <i>Pterocarpus erinaceus</i> en Afrique.....	15
Figure 5 : photos d'arbre et d'organes chez <i>Parkia biglobosa</i>	19
Figure 6 : carte de répartition de <i>Parkia biglobosa</i> en Afrique	20
Figure 7 : images relatives aux 24 différents modèles architecturaux chez les végétaux	24
Figure 8 : exemple d'unité architecturale.	26
Figure 9 : schémas relatifs à la réitération	27
Figure 10 : représentation schématique de diverses modalités de ramification chez les plantes.	30
Figure 11 : schématisation du niveau d'organisation et phénomènes de répétition chez les Phanérogames.	32
Figure 12 : schématisation des gradients morphologiques chez les plantes	33
Figure 13 : schémas présentant les différents types de modèle architectural.	37
Figure 14 : schéma du modèle du processus de fonctionnement du renouvellement chez les plantes.	40
Figure 15 : analyse du fonctionnement d'un méristèmes avec GLOUPS_Fit_GU_main implémentée dans MATLAB.....	43
Figure 16 : illustration de la méthode de Montecarlo du processus stochastique de Bernoulli et de la loi binomiale à six cycles de développements.	44
Figure 17 : structure d'emplacement périodique des phytomères et/ou UC le long d'un axe selon différent rythme de développement.....	45
Figure 18 : description schématique des paramètres de développement topologique.....	46
Figure 19 : schématisation de l'organigramme du fonctionnement du modèle GreenLab.....	51
Figure 20 : formes des fonctions de descente de la loi bêta discrétisée, normalisées sur un intervalle T_0 de 20 cycles.	53
Figure 21 : localisation de l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa.	56
Figure 22 : localisation de la station expérimentale forestière DEFO « Diabaté Kamonon » de Sédiakaha dans le département de Korhogo.	57
Figure 23 : situation géographique des sites d'étude.....	57

Figure 24 : représentation schématique de la mise en place des blocs pour les essais de germination en pépinière pour chaque site expérimental.	61
Figure 25 : dessins relatifs aux marqueurs architecturaux.....	63
Figure 26 : exemple d'échantillonnage phytomère par phytomère par destruction d'axe d'un plant de 6 mois composé de 35 phytomères chez <i>Khaya senegalensis</i>	71
Figure 27 : photos présentant des dimensions d'entités botaniques mesurées sur un phytomère pour l'établissement d'équations allométriques.....	72
Figure 28 : image relative à l'indication des paramètres mathématique de croissance calculés par le modèle GreenLab chez <i>Khaya senegalensis</i>	74
Figure 29 : présentation des constituants botaniques pour l'établissement des séries organiques et des modes de calculs utilisés pour les simulations d'architecture.....	77
Figure 30 : image présentant le diagramme récapitulatif d'obtention des simulations d'architecture en imagerie de synthèse à partir des paramètres de développement et de croissance calculés	80
Figure 31 : classification morphométrique des graines par catégorie de taille après mesure de dimension.....	84
Figure 32 : taux de germination des graines de <i>Khaya senegalensis</i> selon leur taille et le site expérimental.....	87
Figure 33 : vitesse de germination des catégories de graine de <i>Khaya senegalensis</i>	87
Figure 34 : taux de germination des graines de <i>Pterocarpus erinaceus</i> selon leur taille et le site expérimental.....	89
Figure 35 : vitesse de germination des catégories de graine de <i>Pterocarpus erinaceus</i>	89
Figure 36 : taux de germination selon la taille des graines de <i>Parkia biglobosa</i> et le site expérimental.....	90
Figure 37 : vitesse de germination des catégories de graine chez <i>Parkia biglobosa</i>	91
Figure 38 : vigueur de jeunes plants de 4 mois issues de la germination des catégories de tailles de graines chez <i>Khaya senegalensis</i>	92
Figure 39 : dimensions des plantules selon la catégorie de taille de la graine et le site d'étude chez <i>Khaya senegalensis</i>	94
Figure 40 : vigueur de jeunes plants de 4 mois issues de la germination des catégories de tailles de graines chez <i>Pterocarpus erinaceus</i>	95
Figure 41 : dimensions des plantules selon la catégorie de la graine et le site d'étude chez <i>Pterocarpus erinaceus</i>	97

Figure 42 : vigueurs de jeunes plants issues de la germination des catégories de tailles de graines chez <i>Parkia biglobosa</i>	99
Figure 43 : dimensions des jeunes plants selon la catégorie de taille de la graine et le site d'étude chez <i>Parkia biglobosa</i>	100
Figure 44 : images de marqueurs architecturaux chez <i>Khaya senegalensis</i>	103
Figure 45 : variation de la taille et du nombre de phytomères par unité de croissance le long d'une branche de <i>Khaya senegalensis</i>	104
Figure 46 : images d'indicateurs d'arrêts de croissance (AC) le long d'un axe chez <i>Pterocarpus erinaceus</i>	105
Figure 47 : variation de la taille et du nombre de phytomère par unité de croissance le long d'un axe de <i>Pterocarpus erinaceus</i>	105
Figure 48 : images d'indicateurs d'arrêts de croissance et des unités de croissance (UC) le long d'une tige chez <i>Parkia biglobosa</i>	106
Figure 49 : variation de la taille et du nombre de phytomère par unité de croissance le long d'un axe de <i>Parkia biglobosa</i>	107
Figure 50 : séquence de développement, unité et modèle architectural chez <i>Khaya senegalensis</i>	113
Figure 51 : quelques dessins architecturaux chez <i>Khaya senegalensis</i>	116
Figure 52 : séquence de développement, unité et modèle architectural chez <i>Pterocarpus erinaceus</i>	118
Figure 53 : dessins architecturaux chez <i>Pterocarpus erinaceus</i>	121
Figure 54 : séquence de développement, unité et modèle architectural chez <i>Parkia biglobosa</i> .	123
Figure 55 : quelques dessins architecturaux chez <i>Parkia biglobosa</i>	125
Figure 56 : relation linéaire entre la moyenne et la variance du nombre d'UC par tige sur deux stades de développements	130
Figure 57 : variabilité de la moyenne, de la variance et du Bernouilli du nombre de phytomère par UC le long des tiges.....	132
Figure 58 : distributions préformées des UC dans les tiges issues du fonctionnement des méristèmes	134
Figure 59 : distributions binomiales calculées (courbes) et observées (o) du nombre de phytomère des unités de croissance pré/néoformées (courbes grises) et néoformées (courbes rouges) le long des axes	137
Figure 60 : images relatives au fonctionnement du méristème dans la construction des phytomères le long d'une tige à croissance rythmique à du processus de Montecarlo.....	138

Figure 61 : distribution binomiale observée (o) et calculée (courbe) du nombre d'unité de croissance et du nombre de phytomère par tige chez <i>Khaya senegalensis</i>	139
Figure 62 : distribution binomiale observée (o) et calculée (courbe) du nombre d'UC et du nombre de phytomère par tige chez <i>Pterocarpus erinaceus</i>	140
Figure 63 : distribution binomiale observée (o) et calculée (courbe) du nombre d'UC et du nombre de phytomère par tige chez <i>Parkia biglobosa</i>	141
Figure 64 : distribution binomiale calculées (courbe) et observées (o) nombre d'UC préformé par branche et du nombre de phytomère pré/néoformé et néoformé par UC sur les branches de <i>Khaya senegalensis</i>	142
Figure 65 : distribution binomiale calculées (courbe) et observées (o) nombre d'UC préformé par branche et du nombre de phytomère pré/néoformé et néoformé par UC sur les branches de <i>Pterocarpus erinaceus</i>	143
Figure 66 : distribution binomiale calculées (courbe) et observées (o) nombre d'UC préformé par branche et du nombre de phytomère pré/néoformé et néoformé par UC sur les branches de <i>Parkia biglobosa</i>	144
Figure 67 : groupement des espèces par station et par caractéristique de loi d'ajustement... 145	
Figure 68 : courbes de probabilité de ramification, du nombre moyen de branche et du nombre moyen d'UC des branches par rang d'UC du sommet à la base des tiges sur un échantillon de 30 individus de 2 ans chez <i>Khaya senegalensis</i>	146
Figure 69 : courbes de probabilité de ramification, du nombre moyen de branche et du nombre moyen d'UC des branches par rang d'UC du sommet à la base des tiges sur un échantillon de 30 individus de 2 ans chez <i>Pterocarpus erinaceus</i>	147
Figure 70 : courbes de probabilité de ramification, du nombre moyen de branche et du nombre moyen d'UC des branches par rang d'UC du sommet à la base des tiges sur un échantillon de 30 individus de 2 ans chez <i>Parkia biglobosa</i>	148
Figure 71 : histogrammes des paramètres probabilistes de développement topologique des individus de 2 ans	150
Figure 72 : histogrammes de probabilités de développement topologique des individus de 2 ans selon l'analyse de cime au niveau de l'UC.....	155
Figure 73 : simulation topologique de structures potentielles chez les individus de 2 ans ...	156
Figure 74 : modèles allométriques estimant la biomasse sèche des tiges à partir du volumes des entrenœuds chez les espèces cibles	159

Figure 75 : modèles allométriques estimant la biomasse sèche des feuilles à partir du produit de leurs dimensions chez <i>Khaya senegalensis</i>	161
Figure 76 : modèles allométriques estimant la biomasse sèche des feuilles à partir du produit de leurs dimensions chez <i>Pterocarpus erinaceus</i>	162
Figure 77 : modèles allométriques estimant la biomasse sèche des feuilles à partir du produit de leurs dimensions chez <i>Parkia biglobosa</i>	163
Figure 78 : modèles allométriques estimant la surface foliaire à partir des dimensions des feuilles chez les trois espèces cibles.....	165
Figure 79 : fonction de variation du puits des organes feuilles et entrenoeuds à 6 mois	168
Figure 80 : ajustement des séries organiques observées (cercle) et calculées (ligne) des organes de la base au sommet de la tige.....	169
Figure 81 : évolution de l'offre (Q), la demande (D) et du rapport d'offre-demande (Q/D) de biomasse le long des tiges de 6 mois selon le rang des phytomères	171
Figure 82 : simulation par le modèle GreenLab d'arbres âgés de 6 mois	172
Figure 83 : ajustement des séries organiques observées (cercle) et calculées (ligne) des organes feuilles et entrenoeuds de la base au sommet des tiges âgés de 12 mois	174
Figure 84 : évolution de l'offre (Q), la demande (D) et le rapport d'offre-demande (Q/D) le long des tiges de 12 mois selon le rang des unités de croissance	176
Figure 85 : simulation par le modèle GreenLab d'arbres de 12 mois	177
Figure 86 : ajustements des séries organiques et simulation d'architecture avec erreur et correction dans la loi de Pressler.....	180
Figure 87 : différents modes de simulation et multi-ajustements avec la loi de Pressler.....	182
Figure 88 : image relative à l'évolution de la loi de la section de l'élément de cerne en fonction de l'âge physiologique le long du tronc chez <i>Khaya senegalensis</i>	183
Figure 89 : ajustement des séries organiques observées (cercle) et calculées (ligne) des organes des axes de plants de 2 ans.....	184
Figure 90 : évolution de l'offre (Q), la demande (D) et du rapport d'offre-demande (Q/D) le long des tiges de 2 ans selon le rang des UC	186
Figure 91 : ajustement multi-stades des séries organiques observées (o) et calculées (courbes) des organes des tiges de 12 et 24 mois	188
Figure 92 : simulation par le modèle GreenLab d'arbres de 2 ans.....	191

LISTE DES ANNEXES

Annexes 1 : fiche d'évaluation de la germination et de la croissance des semis selon la taille des graines.....	ii
Annexe 2 : images relatives aux choix des semenciers (a) et aux dispositif de semi en bloc à Daloa (b), Korhogo (c), à Montpellier (e) puis à l'arrosage journalier en pépinière (d).....	iv
Annexe 3 : fiche d'analyse architecturale.....	v
Annexe 4 : tableau de l'influence des facteurs habitats, localités et habitat-localités sur la morphologie des unités de croissance chez les jeunes arbres de <i>Khaya senegalensis</i>	vi
Annexe 5 : tableau de l'influence des facteurs habitats, localités et habitat-localités sur la morphologie des unités de croissance chez les jeunes arbres de <i>Pterocarpus erinaceus</i>	vii
Annexe 6 : tableau de l'influence des facteurs habitats, localités et habitat-localités sur la morphologie des modules de croissance chez les jeunes arbres de <i>Parkia biglobosa</i>	viii
Annexe 7 : tableau de l'influence de l'habitat et de la localité sur la morphologie des unités de croissance chez les arbres adultes de <i>Khaya senegalensis</i>	ix
Annexe 8 : tableau de l'influence de l'habitat et de la localité sur la morphologie des unités de croissance chez les arbres adultes de <i>Pterocarpus erinaceus</i>	x
Annexe 9 : tableau de l'influence de l'habitat et de la localité sur la morphologie des modules de croissance chez les arbres adultes de <i>Parkia biglobosa</i>	xi
Annexe 10 : tableau de l'influence de l'habitat et de la localité sur la morphologie des unités de croissance chez les vieux arbres de <i>Khaya senegalensis</i>	xii
Annexe 11 : tableau de l'influence de l'habitat et de la localité sur la morphologie des unités de croissance chez les vieux arbres de <i>Pterocarpus erinaceus</i>	xiii
Annexe 12 : tableau de l'influence de l'habitat et de la localité sur la morphologie des unités de croissance chez les vieux arbres de <i>Parkia biblobasa</i>	xiv
Annexe 13 : images relatives à l'interface (a), à la composition (b) et à la sortie des paramètres d'ajustement calculés (c) du module Fit_GU du logiciel Groupes (GreenLab Opérateur Universel des Plantes Simulées) implémenté dans Matlab.....	xv

Annexe 14 : images relatives à l’organigramme de la simulation du développement des individus à partir du calcul des paramètres de développement dans le logiciel Groupus du modèle GreenLab.....	xvi
Annexe 15 : images relatives à l’organigramme de la simulation de la croissance dans le modèle Greenlab implémenté dans Matlab.....	xvii
Annexe 16 : images relatives à l’ajustement des séries organiques des organes observées (cercle) et calculées (ligne) des feuilles (a b et c) et des entrenœuds (a1, b1 et c1) de la base au sommet de la tige chez les individus de 6 mois à Korhogo chez <i>Khaya senegalensis</i> (a et a1), <i>Pterocarpus erinaceus</i> (b et b1), <i>Parkia biglobosa</i> (c et c1).....	xviii
Annexe 17 : tableau des paramètres source-puits chez les individus de 6 mois à Korhogo.....	xix
Annexe 18 : images relatives à l’évolution de l’offre (Q), la demande (D) et du rapport d’offre-demande (Q/D) selon le rang des phytomères le long des tiges de 6 mois à Korhogo chez <i>Khaya</i> (a) <i>Pterocarpus</i> (b) et <i>Parkia</i> (c).....	xx
Annexe 19 : simulation par le modèle GreenLab de deux individus de 6 mois à Korhogo chez <i>Khaya</i> (a, a1 et a2), <i>Pterocarpus</i> (b, b1 et b2) et <i>Parkia</i> (c, c1 et c2).....	xxi
Annexe 20 : images relatives à l’ajustement des séries organiques composées observées (cercle) et calculées (ligne) des feuilles (a, b et c) et des entrenœuds (a1, b1 et c1) de la base au sommet de la tige d’individus de 12 mois à Korhogo chez <i>Khaya</i> (a et a1), <i>Pterocarpus</i> (b et b1) et <i>Parkia</i> (c et c1).....	xxii
Annexe 21 : tableau de paramètres source-puits chez les individus de 12 mois à Korhogo.....	xxiii
Annexe 22 : images relatives à l’évolution de l’offre (Q), la demande (D) et du rapport d’offre-demande (Q/D) selon le rang des UCs le long des tiges de 12 mois chez <i>Khaya</i> (a), <i>Pterocarpus</i> (b) et <i>Parkia</i> (c) à Korhogo (b).....	xxiv
Annexe 23 : simulation d’un arbre de 12 mois à Korhogo chez <i>Khaya</i> (a, a1 et a2), <i>Pterocarpus</i> (b, b1 et b2) et <i>Parkia</i> (c, c1 et c2).....	xxv
Annexe 24 : images relatives à l’ajustement des séries organiques observées (cercle) et calculées (ligne) des feuilles (a, b et c) et des entrenœuds (a2, b2 et c2) le long des tiges ; puis des feuilles (a1, b1 et c1) et des entrenœuds (a3, b3 et c3) le long des branches d’individus de 24 mois à Korhogo chez <i>Khaya</i> (a, a1, a2 et a3), <i>Pterocarpus</i> (b, b1, b2 et b3) et <i>Parkia</i> (c, c1, c2 et c3).....	xxvi
Annexe 25 : tableau de paramètres source-puits des individus de 24 mois à Korhogo.....	xxvii

Annexe 26 : images relatives à l'évolution de l'offre (Q), la demande (D) et du rapport offre-demande (Q/D) selon le rang des UCs des tiges de 24 mois à Korhogo chez *Khaya* (a), *Pterocarpus* (b) et *Parkia* (c).....xxviii

Annexe 27 : simulation d'individus de 24 mois à Korhogo chez *Khaya* (a, a1 et a2), *Pterocarpus* (b, b1 et b2) et chez *Parkia* (c, c1 et c2).....xxix

Annexe 28 : images relatives à l'ajustement multi-stade des séries organiques observées (cercle) et calculées (Courbes) des feuilles (a, b et c) et des entrenœuds (a1, b1 et c1) des tiges à 12 et 24 mois à Korhogo chez *Khaya* (a et a1), *Pterocarpus* (b et b1) et *Parkia* (c et c1).....xxx

Annexe 29 : tableau des paramètres source-puits du multi-ajustement des stades 12 et 24 mois chez les espèces cibles à Korhogo.....xxxi

Annexe 30 : fonctions de variation de lois Bêta de l'évolution des puits d'UC pour les compartiments feuilles, entrenœuds et cernes (a) et des paramètres source-puits (b) du multi-ajustement chez *Khaya senegalensis*xxxii

Annexe 31 : fonctions de variation de lois Bêta de l'évolution des puits d'UC pour les compartiments feuilles, entrenœuds et cernes (a) et des paramètres source-puits (b) du multi-ajustement chez *Pterocarpus erinaceus*xxxiv

Annexe 32 : fonctions de variation de lois Bêta de l'évolution des puits d'UC pour les compartiments feuilles, entrenœuds et cernes (a) et des paramètres source-puits (b) du multi-ajustement chez *Parkia biglobosa*.....xxxv

Annexe 33 : liens de disponibilité des données de thèse dans un entrepôt numérique de données selon le principe « FAIR : data Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable » (Dataverse and Digital Object Identifier).....xxxvi

INTRODUCTION

En Afrique, environ 55 % des espèces végétales sont en danger dans les forêts, parmi elles 10 % sont déjà éteintes à l'état sauvage (Maréchal *et al.*, 2014). En Afrique subsaharienne, la pauvreté combinée à une démographie galopante, les variations climatiques et les systèmes d'utilisation des terres provoquent la surexploitation de certaines espèces indigènes par les populations rurales. Cette surexploitation constitue une menace grave de divers écosystèmes (Mbowa *et al.*, 2013 ; Maazou *et al.*, 2017 ; Avana-Tientcheu *et al.*, 2019 ; Dumenu, 2019 ; Segla *et al.*, 2020). Pourtant ces écosystèmes et ressources phytogénétiques définissent la base biologique de l'équilibre environnemental local, régional et planétaire (Choat *et al.*, 2012 ; COP 26, 2021). Cet équilibre environnemental est la base du développement durable et une source de sécurité économique, écologique pour l'avenir (Dumenu, 2019 ; Houndonougbo *et al.*, 2020 ; FAO, 2022). Ces ressources concernent les produits et services que la forêt peut fournir (le bois et les produits dérivés du bois, l'eau, la nourriture, le fourrage, les produits médicinaux, le combustible, le logement, l'emploi, les loisirs, l'habitat de la faune sauvage, les puits et réservoir de carbone etc.). La gestion durable de cette ressource est un enjeu majeur pour les populations (Dipelet *et al.*, 2019). Elle sous-entend une gestion et une utilisation des forêts et des espèces à une intensité telles qu'elles maintiennent leur diversité biologique (Chupezi *et al.*, 2009). Cette gestion doit également maintenir la productivité, la capacité de régénération, la vitalité et l'aptitude à satisfaire, aujourd'hui et à l'avenir les fonctions écologiques, économiques et sociales pertinentes aux niveaux local, national, régional et mondial (Leroy *et al.*, 2015). Cette gestion ne doit pas aussi causer de dommages aux autres écosystèmes (Leroy *et al.*, 2015).

En Côte d'Ivoire, la déforestation menace de plus en plus la biodiversité (Cissé *et al.*, 2016 ; Redd+, 2017). Plus de 80 % de la surface forestière a disparu de 1960 à nos jours (De 16 millions à moins de 3 millions d'hectares) à cause d'une agriculture extensive caractérisée par des cultures pures ou sous des ombrages légers et homogène, causant la rareté et la quasi disparition de plusieurs espèces végétales (Piba *et al.*, 2011 ; FAO, 2020). Cette déforestation était principalement localisée dans les forêts denses humides (sempervirente et ombrophile) au sud du pays. Après les avoir fortement réduites, la déforestation migre à grand allure vers les forêts claires décidues et semis décidues (zone de transition forêt-savane et savane) dans le centre et le nord du pays (Tiebre *et al.*, 2016 ; Ministère des Eaux et forêts, 2015 ; Dro *et al.*, 2013). Ce fait cause sur l'ensemble du territoire ivoirien, un dérèglement climatique (décalage saisonnier, pluies diluviennes, variations inhabituelles de températures avec de longues périodes de saisons sèches, etc.) et une perte drastique des ressources phytogénétiques (Annoma & Aké, 1989 ; FAO, 2020).

Comme solution aux effets du changement climatique, le gouvernement ivoirien priorise et recommande deux options qui sont, le reboisement et l'agroforesterie, mais avec des espèces forestières indigènes natives, pour restaurer sa surface forestière et conserver ses ressources en bois (SODEFOR, 2013 ; Kouassi *et al.*, 2019). Dans ce contexte, des enquêtes ont été menées dans plusieurs régions couvrant l'ensemble du pays. Plusieurs espèces forestières indigènes locales ont été identifiées comme ayant un grand potentiel de développement économique majeur pour les populations rurales (Tiébré *et al.*, 2016 ; Adjé *et al.*, 2020a). Cependant, les espèces emblématiques de la zone savanicole du nord du pays, on fait l'objet d'attention et retenues pour cette étude.

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés aux espèces de la zone savanicole pour deux raisons, (1) d'abord parce que la savane occupe la plus grande superficie (54 %) du territoire ivoirien (Guillaumet *et al.*, 1971) et ensuite (2) parce que la savane est négligée dans la plupart des programmes de réhabilitation forestières. Pourtant, elle abrite une très grande biodiversité animale (mammifères supérieurs) et végétale aussi importante que les forêts sempervirentes (Sagang *et al.*, 2020). En effet, les espèces arborescentes de savane jouent un rôle clé dans l'équilibre écologique face à l'avancée du désert et sont la principale source de biens et services essentiels aux populations des savanes (Maazou *et al.*, 2017 ; Avana-Tientcheu *et al.*, 2019). Parmi toutes les espèces observées, nous avons ciblé trois qui sont, *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss., 1830 (Meliaceae), *Pterocarpus erinaceus* Poir., 1804 (Fabaceae) et *Parkia biglobosa*, Jack, R. Br., 1830 (Fabaceae).

Ces espèces sont très menacées car surexploitées par les populations rurales vivant dans le nord de la Côte d'Ivoire en raison de leurs usages multiples (alimentation, sculpture, fourrage, fertilisation, teinture, pharmacopée, bois d'œuvre et de chauffe, culturels, rituels etc.) (Goba *et al.*, 2019 ; Ulrich *et al.*, 2019 ; Houndonougbo *et al.*, 2020). La forte pression qu'elles subissent les expose à une perte de diversité pouvant mener à terme à leur extinction (CITES, 2016 ; Kouonon *et al.*, 2020 ; Silué *et al.*, 2021).

Malgré ce danger, très peu d'études de gestion durable et de préservation ont été entreprises en Côte d'Ivoire sur ces espèces. Les travaux effectués ont été limités aux parcelles de cultures pures mises en place sur une station de recherche du CNRA dans le Nord (Station de recherche Diabaté Kamonon de développement des forêts) par le Centre technique forestier tropical de Côte d'Ivoire (actuel CNRA) en 1988 (Louppe, 1990 ; Louppe *et al.*, 2021a). Il existe aussi des parcelles de cultures mixtes dans le Centre-Ouest (Béoumi) mise en place par la Société de Culture Bananière (SCB), Inprobois et le CIRAD en 2020 (Chesnes *et al.*, 2020).

Quelques études de régénération et de caractérisations morphologique de ces espèces ont été également réalisées (N'Golo *et al.*, 2018 ; Goba *et al.*, 2019 ; Kouonon *et al.*, 2020 ; Silue *et al.*, 2021). Ces pistes d'études limitent la connaissance sur ces espèces. Elles ne donnent pas de résultats sur leur domestication, sur la sélection de génotypes adaptés, sur les paramètres de développement et de croissance du point de vue génétique, botanique et mathématique. Ces pistes ne prennent pas également en compte les effets environnementaux dans la gestion durable de ces espèces. Par ailleurs, l'optimisation de culture, la capacité d'adaptation au climat, les difficultés de développement et la modélisation du fonctionnement des espèces cibles n'ont pas été étudiés. Pourtant tous ces éléments sont importants et utiles dans la recherche d'une agriculture de précision dans ce contexte actuel de changement climatique. Des solutions probables de bonne culture et de sauvegarde de ces espèces sont leur bonne connaissance, leur domestication et l'optimisation de leur culture. Le développement et la proposition de nouveaux outils sont donc nécessaires et attendus.

Dans ce cadre, la production de semence de qualité, l'analyse architecturale et la modélisation structure-fonction peuvent permettre d'accéder à ce résultat. Elles pourraient dans un premier temps donner un point de vue nouveau sur ces espèces et ensuite augmenter leurs niveaux d'informations biologiques. Dans un deuxième temps, faciliter leur gestion durable. L'architecture végétale est un outil d'interprétation multi-échelle et dynamique de la structure de l'arbre. Elle aborde de manière intégrée l'ensemble des processus et des mécanismes qui permettent à la plante de se développer, de survivre et de se reproduire (Hallé *et al.*, 1978 ; Hallé & Keller, 2019). Elle joue un grand rôle modérateur dans la gestion, la culture et l'intégration d'une espèce dans un programme de reboisement et d'agroforesterie.

Dans la diversité des approches architecturales, l'analyse rétrospective (retracer la croissance passée des plantes via les marqueurs laissés par les saisons climatiques) des axes dans l'architecture permet de reconnaître des traits pour des sélections de génotypes résilients pouvant être utilisés pour optimiser la réussite de culture et aussi des milieux favorables à la conduite sylvicole. Elle permet par ailleurs d'établir l'unité ou diagramme architecturale d'une espèce (expression architecturale nécessaire et suffisante permettant à la plante de rentrer dans sa phase de production), base des diagnostics d'évaluation de santé, de phénologie, de productivité et de reproductivité des arbres. Son état dans une situation donnée donne des conclusions et permet d'ouvrir des perspectives de gestion durable, mais elle est très souvent altérée et moins visible par le phénomène de duplication des arbres. Il est donc nécessaire de la faire ressortir pour deux points. D'abord l'unité architecturale des trois espèces cibles n'est pas

connue et donc permet de compléter leur biologie déjà peu connue. Ensuite cette unité architecturale sera la base des futurs diagnostics et de gestion dans différentes conditions pédoclimatiques. L'analyse architecturale a été utilisée pour gérer efficacement plusieurs espèces et des forêts en Europe et en Amérique du sud (Sabatier *et al.*, 2014 ; Anest *et al.*, 2021). Elle n'a jamais été utilisée et appliquée sur ces espèces dans un cadre de gestion ou d'optimisation de culture.

Enfin, la modélisation structure-fonction permet dans un premier temps de mieux expliquer l'architecture d'une espèce et dans un second d'accéder à ses fonctions source-puits (paramètres cachés) intrinsèques et non influençables par l'environnement (Fourcaud *et al.*, 2008 ; De Reffye, 2009, Jaeger *et al.*, 2020). Elle permet de restituer la cinétique de développement et de comprendre la dynamique de croissance d'une espèce. Elle permet d'avoir des outils efficaces et nécessaires pour l'amélioration génétique. Elle permet également de faire des prédictions de récoltes et d'orienter des associations culturales fiables (culture sciaphile et/ héliophile). Dans la majorité des cas, la modélisation permet d'optimiser les itinéraires culturaux, de guider les stratégies de mesure et protocoles expérimentaux pertinents, puis de réduire la durée des expérimentations sur le terrain (De Reffye *et al.*, 2021).

Parmi les nombreux modèles mathématiques et écophysologiques permettant de modéliser le fonctionnement et l'architecture des plantes (Amapsim, Lignum, Rosgro etc.), le modèle GreenLab apparaît comme le plus avancé (De Reffye & Jaeger, 2013). Il reproduit de manière satisfaisante les données mesurées, restitue la dynamique de la production de biomasse et sa répartition dans la plante. Il permet de simuler l'architecture et la croissance de la plante à court, moyen et long terme. Il permet de prendre des décisions pour l'amélioration génétique des espèces et ouvre des voies à l'optimisation des systèmes de cultures à l'échelle du peuplement (De Reffye *et al.*, 2021). De nombreux travaux de modélisation à partir du modèle GreenLab ont été réalisés chez plusieurs espèces de plante de grands intérêts agronomiques (Kang *et al.*, 2011 ; Tondjo *et al.*, 2018 ; De Reffye *et al.*, 2021). Le modèle n'avait jamais été appliqué sur les espèces arborescentes indigènes de savane originaires d'Afrique de l'Ouest, notamment sur *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* et *Parkia biglobosa*.

Cette thèse s'inscrit dans un cadre où des questionnements sur le devenir et la sauvegarde des ressources végétales est particulièrement prégnant. Elle s'inscrit également dans un cadre où la compréhension du fonctionnement des plantes est d'un intérêt capital dans ce contexte actuel des changements globaux. L'objectif général de cette étude est d'optimiser la

culture de *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* et *Parkia biglobosa*, trois essences agroforestières indigènes en Côte d'Ivoire.

De façon spécifique, il s'agit de :

- sélectionner des semences de qualité garant de bonnes performances germinatives et de semis vigoureux vis-à-vis d'un climat changeant chez les espèces cibles ;
- localiser des zones de cultures propices des espèces cibles le long d'un gradient bioécologique Sud-Nord en Côte d'Ivoire, à l'aide de marqueurs architecturaux ;
- établir le diagramme architecturale des espèces cibles ;
- et d'établir les paramètres de développement et de croissance, permettant de simuler le fonctionnement méristématique, le développement et la croissance multi-échelle chez les espèces cibles.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons émis quatre grandes hypothèses que sont :

- la taille des graines et l'environnement maternel influencent les performances germinatives et la croissance des semis ;
- la plasticité des marqueurs architecturaux indique les difficultés de développement et donne des orientations sur les environnements propices à la culture des espèces cibles ;
- le diagramme et les caractéristiques architecturales permettent de mieux connaître et comprendre le fonctionnement des espèces cibles pour leur bonne culture ;
- le model GreenLab calibre bien sur les espèces cibles et fourni les paramètres source-puits permettant de simuler l'architecture des espèces cibles.

Outre l'introduction, la conclusion et les perspectives, ce mémoire est organisé en trois parties :

- la première partie est la revue bibliographique. Elle fait une présentation générale des trois espèces forestières ciblées, l'architecture des végétaux et la présentation du modèle GreenLab.
- la deuxième partie présente la zone d'étude, décrit le matériel expérimental puis les méthodes de caractérisation et d'analyse mis en œuvre ;
- la troisième partie expose les résultats obtenus et leur discussion.

PREMIERE PARTIE : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre 1 : Généralités sur le Caïlcédrat (*Khaya senegalensis*), le bois de Vène (*Pterocarpus erinaceus*) et le Néré (*Parkia biglobosa*)

1.1. Généralités sur *Khaya senegalensis* (Desr.) A.Juss. (Meliaceae)

Khaya senegalensis (Desr.) A.Juss. Paris 19, 250 (1830), avec un nombre de chromosomes de $2n = 50$, est aussi appelé acajou de savane ou du Sénégal ou Caïlcédrat ou encore Bois de Mahagoni (Nikiema & Pasternak, 2008 ; Inventaire national du patrimoine naturel, 2021a).

1.1.1. Position taxonomique

Domaine	: Biota Endl. (D.Don)
-Règne	: Plantae Haeckel, 1866
-Sous-Règne	: Viridiaeplantae
-Infra-Règne	: Streptophyta John, Williamson & Guiry, 2011
-Classe	: Equisetopsida C. Agardh, 1825
-Clade	: Tracheophyta Sinnott ex Cavalier-Smith, 1998
-Clade	: Spermatophyta
-Sous-Classe	: Magnoliidae Novák ex Takht., 1967
-Super-Ordre	: Rosanae Takht., 1967
-Ordre	: Sapindales Juss. Ex Bercht. & I ; Presl, 1820
-Famille	: Meliaceae Juss., 1789
-Sous-Familles	: Swietenioideae
-Genre	: <i>Khaya</i> A.Juss., 1830
-Espèce	: <i>Khaya senegalensis</i> (Desr.) A.Juss., 1830

(Sources : Muséum National d'Histoire Naturelle de l'unité Patrimoine Naturel & Office Française de la Biodiversité, 2021)

1.1.2. Description botanique

Khaya senegalensis (Figure 1) est un arbre monoïque de taille moyenne atteignant 30 à 35 m de hauteur. Le fût est dépourvu de branches jusqu'à 10 à 16 m de hauteur, mais quelque fois bien plus court et tortueux, atteignant 1 à 2,5 m de diamètre (Nikles *et al.*, 2004 ; Neya, 2006). Au contreforts courts ou absents, la surface de l'écorce a une couleur variée de grise à gris foncé ou brun grisâtre, initialement lisse mais devient écailleuse à minces écailles arrondies. L'écorce interne varie de rose foncé à rougeâtre, sécrétant une gomme rougeâtre. La cime est arrondie et dense avec des rameaux glabres. Les feuilles sont disposées en spirale mais

groupées vers l'extrémité des branches. Elles sont composées paripennées de 2 à 13 paires de folioles, les stipules sont absentes. Le pétiole et le rachis atteignent ensemble 25 cm de longueur. Les pétiolules varient de 3 à 4 mm de longueur. Les folioles sont opposées ou presque, elliptiques à oblongues, de 5 à 12 cm de longueur et 2,5 à 5 cm de largeur. L'inflorescence est une panicule axillaire ou quasi terminale atteignant jusqu'à 20 cm de longueur. Les fleurs sont unisexuées, les fleurs mâles et femelles sont d'apparence très similaire, aux couleurs blanchâtres et à parfum doux (figure 1). Le pédicelle varie de 1 à 2 mm de longueur. Le calice est lobé presque jusqu'à la base avec des lobes arrondis d'environ 1,5 mm de longueur. Les pétales sont libres, elliptiques plus ou moins capuchonnés de dimension d'environ 4 mm de longueur et 2 mm de largeur. Les étamines sont soudées en un tube urcéolé d'environ 5 mm de longueur composées de 8 anthères normalement incluses à proximité de l'apex qui alternent avec des lobes arrondis. L'ovaire est supère, globuleux à conique avec un diamètre de 1 à 2 mm et 4 loculaires. Le style atteint 1 mm de longueur. Le stigmate est discoïde. La fleur mâle a un ovaire rudimentaire. La fleur femelle a des anthères plus petites et indéhiscentes. Le fruit est une capsule ligneuse érigée, presque globuleuse de diamètre 4 à 6 cm, de couleur gris pâle à brun grisâtre, déhiscente par 4 valves, contenant de nombreuses graines. Les graines sont discoïdes ou quadrangulaires, fortement aplaties, d'environ 2 cm × 2,5 cm et entourées d'une aile étroite brunes (Reis *et al.*, 2021 ; Orwa *et al.*, 2009). La plantule est à germination hypogée. Le cotylédon reste enfermé dans le tégument. L'épicotyle varie de 5 à 6 cm de longueur. Les deux premières feuilles (cotylédonaires) sont opposées et simples.

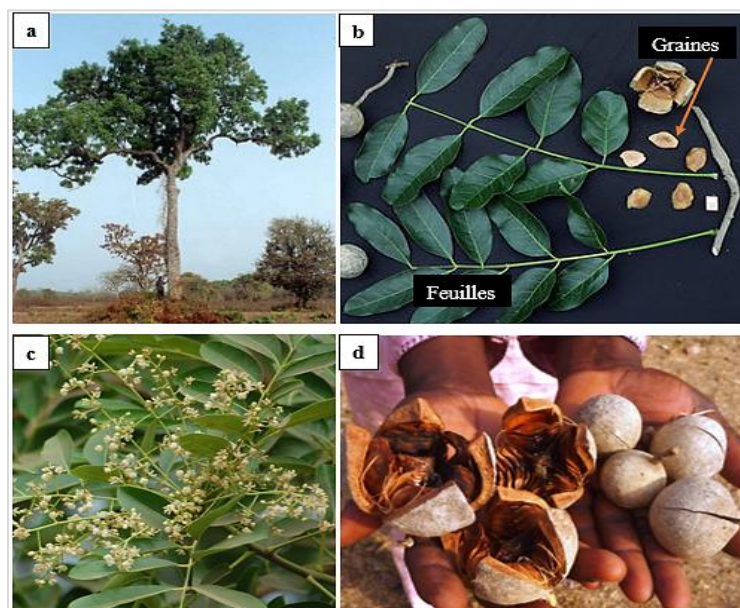


Figure 1 : photos d'arbre et d'organes chez *Khaya senegalensis*.

a : arbre adulte, b : feuilles composées paripennées et graines, c : inflorescences, d : fruits.

(Source : PROTA, 2022)

Le genre *Khaya* comprend 4 espèces sur le continent africain et 1 ou 2 endémiques des Comores et de Madagascar. Il est étroitement apparenté à *Carapa* et *Swietenia* (Dipelet *et al.*, 2019 ; Nikiema & Pasternak, 2008). Les espèces de *Khaya* ont de fortes ressemblances au niveau des fleurs et des fruits. Les différences les plus nettes résident dans leurs folioles. *Khaya senegalensis* est proche de *Khaya anthotheca* (Welw.) C.DC. et de *Khaya grandifoliola* C.DC., mais il est habituellement plus petit dans toutes ses parties (Dipelet *et al.*, 2019). Le bois de *Khaya senegalensis* ressemble davantage au vrai acajou (issu de *Swietenia spp.*) que le bois de *Khaya anthotheca* et *Khaya ivorensis*. Son bois est plus lourd et plus dur. La ressemblance de bois la plus forte est avec celui de *Khaya grandifoliola* C.DC. Le bois de makoré (*Tieghemella*) lui ressemble également avec une plus grande durabilité (Dipelet *et al.*, 2019).

1.1.3. Répartition géographique et écologie

Khaya senegalensis est présent depuis la Mauritanie et le Sénégal jusqu'au nord de l'Ouganda (Orwa *et al.*, 2009). Il est couramment planté sur son aire de répartition naturelle (Figure 2), surtout comme arbre d'ornement et d'alignement. Il est aussi en dehors de cette région, par exemple au Cap-Vert, en Tanzanie, au Malawi, à Madagascar, à la Réunion, en Egypte, en Afrique du Sud, en Inde, en Indonésie, au Vietnam, en Australie et en Amérique tropicale. *Khaya senegalensis* se rencontre dans la savane boisée, souvent dans les endroits humides et le long des cours d'eau, dans des régions ayant 650 à 1300 mm et même jusqu'à 1800 mm de pluviométrie annuelle et une saison sèche de 4 à 7 mois. Il est présent de 1500 à 1800 m d'altitude. Il est également présent parfois en même temps que *Khaya grandifoliola*. Il préfère les sols alluviaux profonds et bien drainés et les termitières. Il peut aussi se trouver sur les sols rocailleux peu profonds, sur lesquels il est de plus petite taille. Il tolère l'inondation pendant la saison des pluies (Arbonnier, 2004).

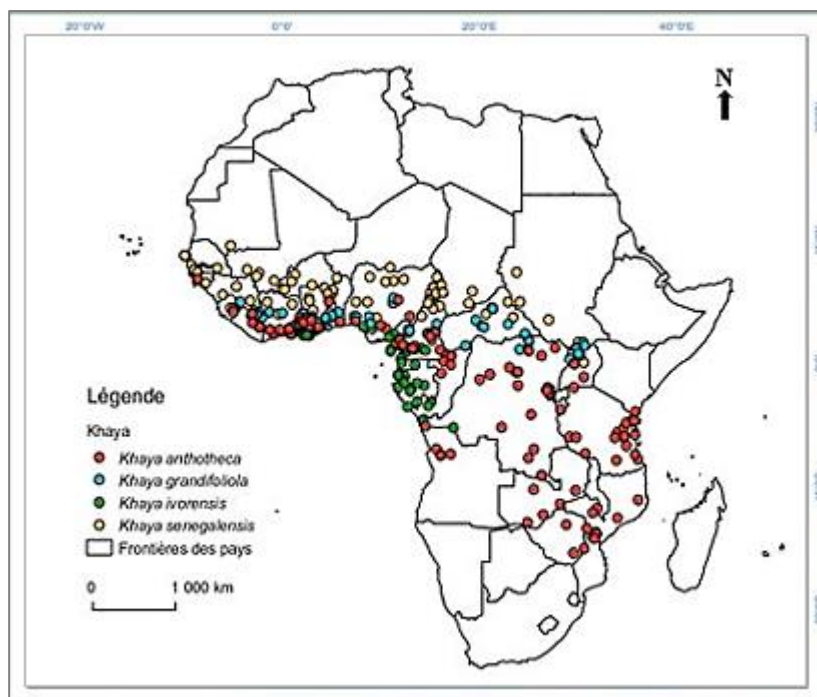


Figure 2 : carte de répartition du genre *Khaya* en Afrique

(Source : Dipelet *et al.*, 2019)

1.1.4. Usages

Le bois de *Khaya senegalensis* est apprécié pour la charpenterie, la menuiserie, la fabrication de meubles, l'ébénisterie, la construction navale et les placages décoratifs. Il convient pour la construction, les revêtements de sol, les boiseries intérieures, les jouets, les bibelots, les traverses de chemin de fer, le tournage et la pâte à papier. Traditionnellement, le bois est utilisé pour fabriquer des pirogues monoxyles, des ustensiles ménagers tels que des mortiers et des tambours. Il est utilisé comme bois de feu et pour la production de charbon de bois (Ulrich *et al.*, 2019 ; Dipelet *et al.*, 2019 ; Issa *et al.*, 2017).

L'écorce, de saveur amère, est très appréciée en médecine traditionnelle. Des décoctions ou des macérations d'écorce sont utilisés couramment contre la fièvre due à la malaria. Il est aussi appliqué contre les maux d'estomac, la diarrhée, la dysenterie et l'anémie. Il est aussi d'antalgique dans les cas de rhumatismes et de maux de tête, et comme tonique, emménagogue et vermifuge. Les décoctions s'emploient aussi comme purgatif, antidote et abortif pour traiter la syphilis, la lèpre, la varicelle et l'angine. En usage externe, l'écorce s'applique comme désinfectant dans les cas d'inflammation et pour traiter les maladies de peau, éruptions cutanées, gale, plaies, ulcères, furoncles, hémorroïdes, œdèmes et maux de dents. L'écorce s'utilise couramment en médecine vétérinaire, pour ses propriétés vermifuges, toniques et

apéritives, et pour traiter la trypanosomiase, les douves du foie, la diarrhée et les ulcères. Au Cameroun, l'écorce est recherchée comme additif dans la fabrication de la bière locale. Au Ghana, l'écorce sert à teindre les étoffes en brunâtre. Les feuilles sont également utilisées en médecine traditionnelle, pour traiter les problèmes de peau, les plaies, la jaunisse, les œdèmes, les maux de tête et la dépression, et comme purgatif. Les racines s'emploient contre la jaunisse, les maux d'estomac, les œdèmes et l'aménorrhée. En Ouganda, les racines et l'écorce entrent dans la composition de complexes poisons de flèche dont les racines ou les graines de *Strophanthus* sont l'ingrédient principal. Les fleurs sont utilisées dans des remèdes contre les maux d'estomac et la syphilis. L'huile des graines se frictionne pour traiter les rhumatismes et la grippe, et se prend pour traiter la syphilis. Les ramilles et racines sont utilisés comme bâtonnets à mâcher et cure dent. L'huile des graines est utilisée dans les cosmétiques et en cuisine. La cendre de bois s'ajoute aux grains stockés pour prévenir les attaques d'insectes (Dougnon *et al.*, 2021 ; Zohoun *et al.*, 2018 ; Shayoub *et al.*, 2016 ; Kankia & Zainab, 2014 ; Nikiema & Pasternak, 2008).

1.1.5. Ressources génétiques

Khaya senegalensis figure sur la Liste rouge de l'Union International de Conservation de la Nature en tant qu'espèce vulnérable en raison de la perte et de la dégradation de son milieu, ainsi que de l'abattage sélectif pour son bois (Word Conservation Monitoring Centre, 1998). Comme d'autres *Khaya spp.*, les peuplements ont été appauvris dans de nombreuses régions par des siècles d'exploitation commerciale. La surexploitation actuelle de *Khaya senegalensis* pour son usage multiple (bois d'œuvre, fourrage et médicinale) représente une grave menace pour ses peuplements naturels. Des méthodes durables de récoltes doivent être donc instaurées et mise en œuvre le plus rapidement possible. Le besoin de recherche pour y parvenir devrait plus se focaliser sur les conditions environnementales et l'utilisation traditionnelle des terres pour une démarche scientifique avérée.

1.2. Généralités sur *Pterocarpus erinaceus* Poir (Fabaceae)

Pterocarpus erinaceus Poir., Encycl. 5, 728 (1804), avec un nombre de chromosomes de $2n = 22$, de la famille des Fabaceae est également appelé bois de vène ou bois de rose Africain ou palissandre du Sénégal ou kino de Gambie ou santal rouge d'Afrique ou hérissé (Inventaire national du patrimoine naturel, 2021b ; Lu *et al.*, 2020 ; Johnson *et al.*, 2020b ; Duvall, 2008).

1.2.1. Position taxonomique

Domaine	: Biota Endl. (D.Don)
-Règne	: Plantae Haeckel, 1866
-Sous-Règne	: Viridaeplantae
-Infra-Règne	: Streptophyta John, Williamson & Guiry, 2011
-Classe	: Equisetopsida C. Agardh, 1825
-Clade	: Tracheophyta Sinnott ex Cavalier-Smith, 1998
-Clade	: Spermatophyta
-Sous-Classe	: Magnoliidae Novak ex Takht., 1967
-Super-Ordre	: Rosanae Takht., 1967
-Ordre	: Fabales Bromhead, 1838
-Famille	: Fabaceae Lindl., 1836
-Sous-Familles	: Papilionoideae DC., 1825
-Super-Tribu	: Dalbergioids
-Tribu	: Dalbergieae Bronn ex DC., 1825
-Sous-Tribu	: Pterocarpinae Benth., 1860
-Genre	: <i>Pterocarpus</i> Jacq., 1763
-Espèce	: <i>Pterocarpus erinaceus</i> Poir., 1796

(Sources : Muséum National d'Histoire Naturelle de l'unité Patrimoine Naturel & Office Française de la Biodiversité, 2021)

1.2.2. Description botanique

Pterocarpus erinaceus (Figure 3) est un arbre caducifolié atteignant 15 à 25 m de hauteur avec un fût droit, cylindrique et dépourvu de branches sur une hauteur atteignant 10 m dans de bonnes conditions. Il est cannelé et ramifié à la base dans de mauvaises conditions. Son diamètre varie de 75 à 100 cm avec de légers contreforts. La couleur de l'écorce varie du brun grisâtre à noirâtre ; l'écorce est fissurée et écailleuse. La couleur de l'écorce interne varie du brun jaunâtre à veines rougeâtres et sécrète une gomme translucide rougeâtre lorsqu'on l'entaille. La cime est arrondie, ouverte et les rameaux sont densément couverts de poils courts à l'état jeune. Les feuilles sont alternes, composées imparipennées de 5 à 17 folioles avec des stipules linéaires poilues et d'environ 9 mm de longueur qui tombent précocement. Le pétiole a une longueur variant de 3 à 7 cm. Le rachis poilu varie de 7 à 22 cm de longueur. Les pétioles ont une longueur variant de 3 à 8 mm. Les folioles sont alternes, ovales à elliptiques de longueurs variant de 4 à 11 cm et de largeur variant de 2 à 6 cm. La base des folioles est arrondie

ou obtuse, l'apex est obtus ou légèrement acuminé avec des extrémités faiblement émarginées, papyracées et épaisses à poils brunâtres à l'état jeune. L'inflorescence est une panicule axillaire ou terminale de 7 à 20 cm de longueur, densément couverte avec des poils bruns. Les bractées ont jusqu'à 6 mm de longueur et tombent précocement. Les fleurs sont bisexuées, papilionacées avec des pédicelles poilus de 4 à 8 mm de longueur. Le calice est campanulé densément poilu d'environ 7 mm de longueur avec 5 dents triangulaires de 1 à 2,5 mm de longueur. La corolle à pétales est pourvue d'onglet jaune doré, d'étendard presque circulaire atteignant 15 mm × 13 mm. Les ailes atteignent 13 mm de longueur. La carène atteint 10 mm de longueur. Les étamines sont au nombre de 10 et sont soudées en une gaine atteignant 8,5 mm de longueur. Les étamines supérieures sont parfois libres. L'ovaire est supère, stipité, poilu et le style presque glabre. Il peut atteindre 5 mm de longueur. Le fruit est une gousse circulaire, aplatie et indéhiscente de 4 à 7 cm de diamètre sur un stipe atteignant 1 cm de longueur et pourvu d'une aile papyracée. Il est finement nervuré à bord ondulé ou plissé, garnie d'aiguillons sur la partie qui porte les graines, de couleur paille composée de 1 à 2 graines. Les graines sont réniformes, plates à légèrement épaissies d'environ 10 mm × 5 mm de dimension et lisses de couleurs rouges à brun foncé. La plantule à une germination épigée avec des cotylédons foliacés (Johnson *et al.*, 2020a ; Segla *et al.*, 2020 ; Alaba *et al.*, 2021a ; Louppe *et al.*, 2021b). Le genre *Pterocarpus* comprend environ 65 espèces (Duvall, 2008 ; Dumenu & Bandoh, 2016).

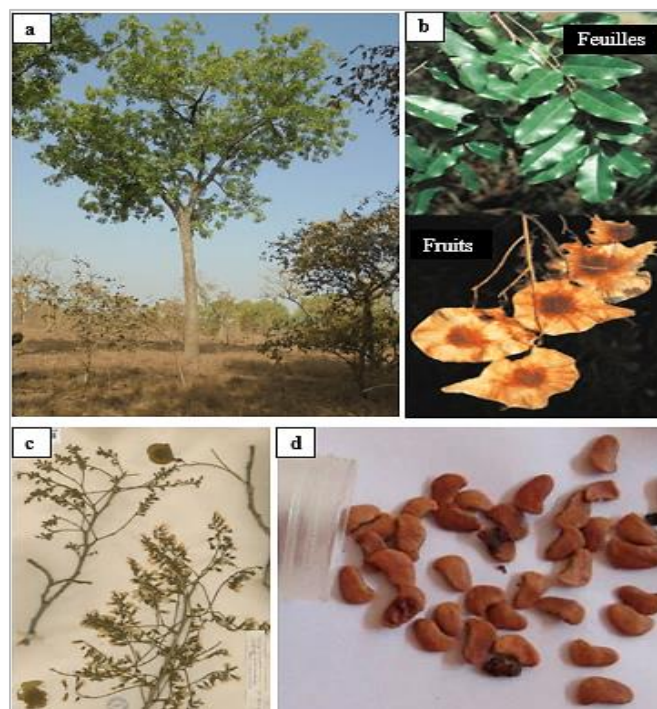


Figure 3: photos d'arbre et d'organes chez *Pterocarpus erinaceus*.

a : arbre adulte, b : feuilles composées et fruits, c : inflorescences, d : graines.

(Source : PROTA, 2022)

1.2.3. Répartition géographique et écologie

En Afrique (Figure 4), *Pterocarpus erinaceus* est répandu dans la zone des savanes d'Afrique de l'Ouest à l'Afrique Centrale ; c'est-à-dire la zone qui s'étend du Sénégal à la Centre Afrique en passant par la Gambie (Rabiou *et al.*, 2021 ; Alaba *et al.*, 2021a). Il est présent également dans les régions de savanes arborées semi-arides à sub-humides d'altitude variant de 600 à 1200 m où la pluviométrie annuelle atteint 600 à 1200 et même 1600 mm avec une saison sèche longue (jusqu'à 9 mois) et une température annuelle moyenne de 15 à 32°C (Duvall, 2008). Il est trouvé sur tous types de sols, mais il préfère les sols acides à neutres, légers à moyens, drainant librement. Il peut survivre aux incendies de brousse annuels (Rabiou *et al.*, 2019).

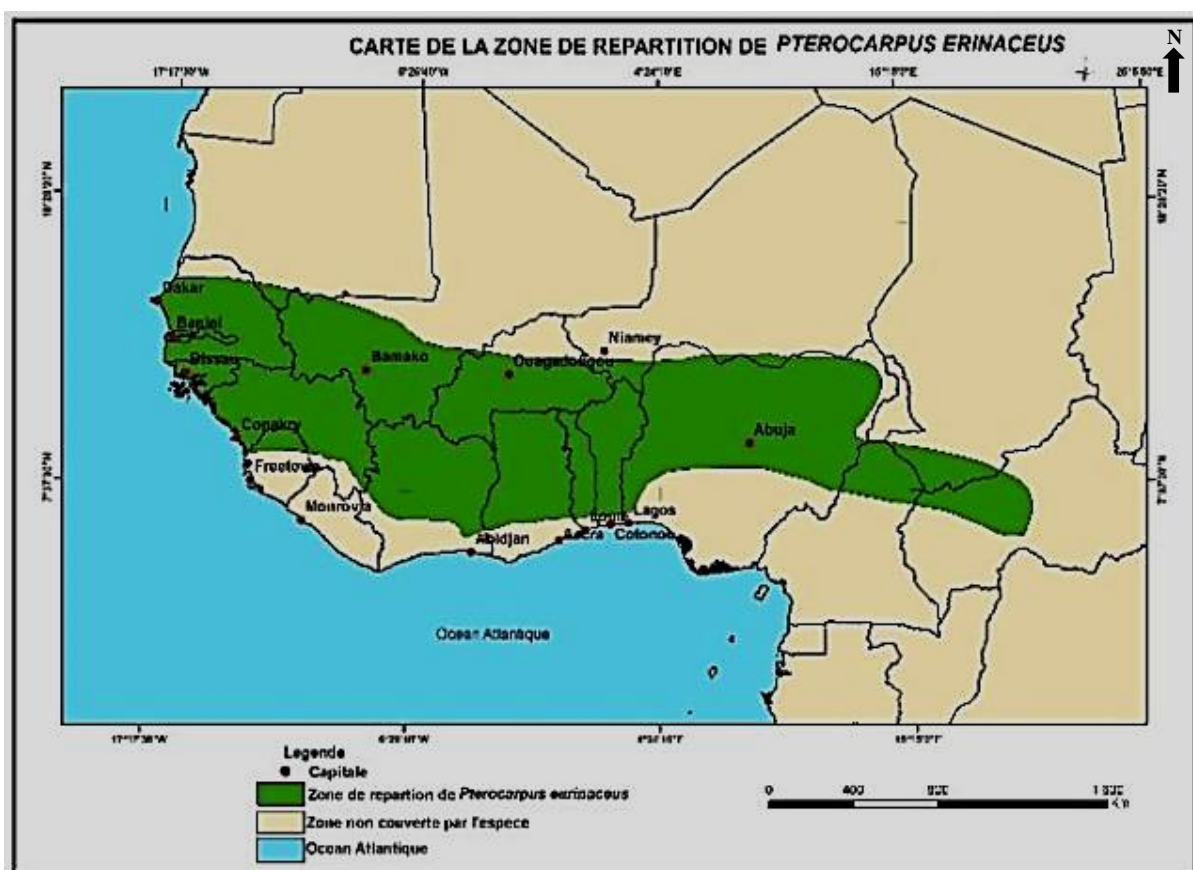


Figure 4 : carte d'aire de répartition de l'espèce *Pterocarpus erinaceus* en Afrique.

(Source : Arbonnier, 2009)

1.2.4. Usages

Le bois de *Pterocarpus erinaceus* est extrêmement apprécié pour la fabrication de meubles et l'ébénisterie, mais il s'emploie aussi en construction de maisons et de bateaux, y compris les installations hydrauliques, les parquets, les escaliers, les outils, le tournage, la

sculpture et les placages tranchés. Il convient aussi à la menuiserie, à la décoration intérieure, aux mortiers et piliers, aux montants des maisons, aux étais de mine, à la construction de navires et de barques, aux châssis de véhicules, aux articles de sport, aux jouets, aux bibelots, aux instruments de musique (balafons par ex.) et aux instruments de précision. Il est utilisé pour des arcs avec ses racines. Le bois se prête à la production de combustible et de charbon de bois (Dumenu & Bandoh, 2016 ; Ahmed *et al.*, 2017 ; Adjonou *et al.*, 2018). Le duramen est une source de colorant rouge, utilisé pour teindre les étoffes, le corps ou les cheveux. L'écorce est parfois utilisée pour le tannage. L'exsudat rougeâtre de l'écorce (le "kino") est battu au maillet sur le tissu pour lui donner un apprêt. Le kino est couramment employé en médecine traditionnelle, en usage interne pour traiter la diarrhée, la dysenterie, la fièvre, la gonorrhée et les infections dues aux vers intestinaux. Il sert au traitement des maux oculaires, les ulcères et les plaies. La décoction ou les infusions d'écorce ou de racines servent à traiter les infections bronchiques, les maux de dents, la dysenterie, les menstruations douloureuses, l'anémie, la gonorrhée, les hémorragies post-partum, les infections du ténia, la lèpre, les plaies, les tumeurs et les ulcères. Il sert aussi pour traiter leurs vertus anti-émétique, purgative et tonique. Des préparations à base de racines sont administrés en lavement pour traiter les maladies vénériennes. Des décoctions de feuilles s'appliquent pour traiter la fièvre, la syphilis, et s'utilisent pour leurs vertus aphrodisiaques et comme répulsif contre les insectes. Les rameaux feuillés sont broutés par le bétail et revêtent une importance particulière vers la fin de la saison sèche lorsqu'il ne reste plus grands choses à manger. Les éleveurs dépendent énormément de *Pterocarpus erinaceus* dans les savanes boisées de la zone soudanienne (; Nouffou *et al.*, 2010 ; Hage *et al.*, 2015 ; Amed *et al.*, 2017 ; Adjonou *et al.*, 2018).

1.2.5. Ressources génétiques

Le bois d'œuvre de *Pterocarpus erinaceus* est très important sur les marchés locaux et le commerce international (Dumenu, 2019). Un broutage excessif et une surexploitation résultant de la récolte de fourrage à la saison sèche sont signalés dans de nombreux pays comme le Mali et le Burkina Faso. Ceci soumet par endroits les peuplements de *Pterocarpus erinaceus* à une forte pression. Dans certains pays comme la Gambie, le Nigeria, le Ghana, la Côte d'Ivoire, les coupes de bois précieux s'effectuent de manière excessives, abusées et non durable (Goba *et al.*, 2019 ; Couch *et al.*, 2019 ; Dumenu, 2019). La récolte de bois d'œuvre ou de fourrage de *Pterocarpus erinaceus* est illégale dans plusieurs pays, dont le Mali et la Côte d'Ivoire (Duvall, 2008 ; N'golo *et al.*, 2018). Comme arbre réellement polyvalent, *Pterocarpus erinaceus* présente un grand intérêt pour les systèmes agroforestiers, pas seulement à cause de

ses produits de valeur comme le bois, le fourrage, le combustible ou les remèdes, mais aussi parce qu'il peut améliorer la fertilité du sol (Alaba *et al.*, 2021b). A ce titre, *Pterocarpus erinaceus* présente un grand intérêt pour les chercheurs.

1.3. Généralités sur *Parkia biglobosa* (Jacq.) R.Br (Fabaceae)

Parkia biglobosa (Jacq.) R.Br. ex G.Don, Protologue: Loudon, Hort. brit. : 277 (1830) appelée également Néré, arbre à farine, caroubier Africain possède comme nombre de chromosomes de $2n = 26$ (Sina & Traoré, 2002). Il a quatre synonymes que sont *Mimosa biglobosa* Jacq. (1763), *Parkia africana* R.Br. (1826), *Parkia clappertoniana* Keay (1955) et *Parkia filicoidea* auct. non Welw. ex Oliv (Sina, 1999 ; Dukku, 2010 ; Inventaire national du patrimoine naturel, 2021c).

1.3.1. Position taxonomique

Domaine	: Biota Endl. (D.Don)
-Règne	: Plantae Haeckel, 1866
-Sous-Règne	: Viridaplantae
-Infra-Règne	: Streptophyta John, Williamson & Guiry, 2011
-Classe	: Equisetopsida C. Agardh, 1825
-Clade	: Tracheophyta Sinnott ex Cavalier-Smith, 1998
-Clade	: Spermatophyta
-Sous-Classe	: Magnoliidae Novák ex Takht., 1967
-Super-Ordre	: Rosanae Takht., 1967
-Ordre	: Fabales Bromhead, 1838
-Famille	: Fabaceae Lindl., 1836
-Sous-Familles	: Caesalpinioideae DC., 1825
-Tribu	: Mimoseae Bronn, 1822
-Genre	: <i>Parkia</i> R.Br., 1826
-Espèce	: <i>Parkia biglobosa</i> (Jacq.) R.Br. ex G. Don, 1830

(Sources : Muséum National d'Histoire Naturelle de l'unité Patrimoine Naturel & Office Française de la Biodiversité, 2021)

1.3.2. Description botanique

Parkia biglobosa (figure 5) est un arbre avec une taille moyenne de 20 à 30 m de hauteur. Le fût est généralement droit, robuste et cylindrique allant jusqu'à 130 cm de diamètre ;

le tronc est souvent ramifié à faible hauteur. L'écorce épaisse de couleur grise à brun grisâtre avec des tranches fibreuses et brun rougeâtre est distinctement fissurée longitudinalement avec souvent des écailles plus ou moins régulières entre les fissures qui exsude une gomme ambrée. La cime est dense et s'étale largement en forme d'ombrelle, constituée de grosses branches. Les feuilles sont alternes, composées bipennées de longueur variant de 30 à 40 cm. Le pétiole renflé à la base avec une glande orbiculaire varie de 4 à 12,5 cm de longueur. Le rachis avec une arête caduque à l'apex porte 2 à 17 paires de pennes ou folioles avec une glande entre les pennes terminales. Elles sont composées de 13 à 60 paires de foliollules ; les quelles sont sessiles, oblongues de dimension variant de 8 à 30 mm de longueur et de 1,5 à 10 mm de largeur. Elles sont très inégales à la base avec une auricule proximale, arrondies ou obtuses à l'apex, glabres mais légèrement ciliées près de l'apex.

L'inflorescence est une « tête pendante » disposée de façon racémeuse avec un pédoncule de longueur variant de 10 à 35 cm. Elle est capitule bi-globuleux avec une portion distale beaucoup plus grande de 3,5 à 6 cm de diamètre. La couleur est rouge brillant à l'anthesis et devient rose saumon portant de nombreuses fleurs. La fleur est bisexuée, mâle ou stérile, sessiles mais pseudopédicellée par la fusion des bases du calice, de la corolle et des étamines. Le calice et la corolle sont tubulaires et lobées. Les fleurs bisexuées sont situées dans la partie distale du capitule et ont une longueur de 10 à 17 mm avec 10 étamines longuement saillantes et un ovaire supère loculaire. Le style est filiforme. Le stigmate est en forme de coupe. Les fleurs mâles sont situées dans la portion basale du capitule avec des longueurs variant de 6 à 7 mm avec des étamines non-saillantes, nectarifères. Les fleurs stériles sont situées à la base extrême de la portion basale du capitule et longues de 6 à 7 mm avec étamines rudimentaires.

Le fruit composé de 5 à 23 graines est une gousse oblongue de dimension variant de 12 à 35 cm de longueur et de 1,5 à 2,5 cm de largeur, légèrement falciforme avec un stipe variant de 1 à 4 cm de longueur à la base, subcylindrique, glabre et lisse puis généralement brune lorsqu'il mûri. Les graines sont logées dans un endocarpe jaunâtre, globuleuse-ovoïde, légèrement comprimées de longueur variant de 0,5 à 1,5 cm. Le tégument dur, lisse, et brun foncé brillant (Sina & Traoré, 2002 ; Houndonougbo *et al.*, 2020 ; Dukku, 2010 ; Dotchamou *et al.*, 2016 ; Louppe *et al.*, 2021c).

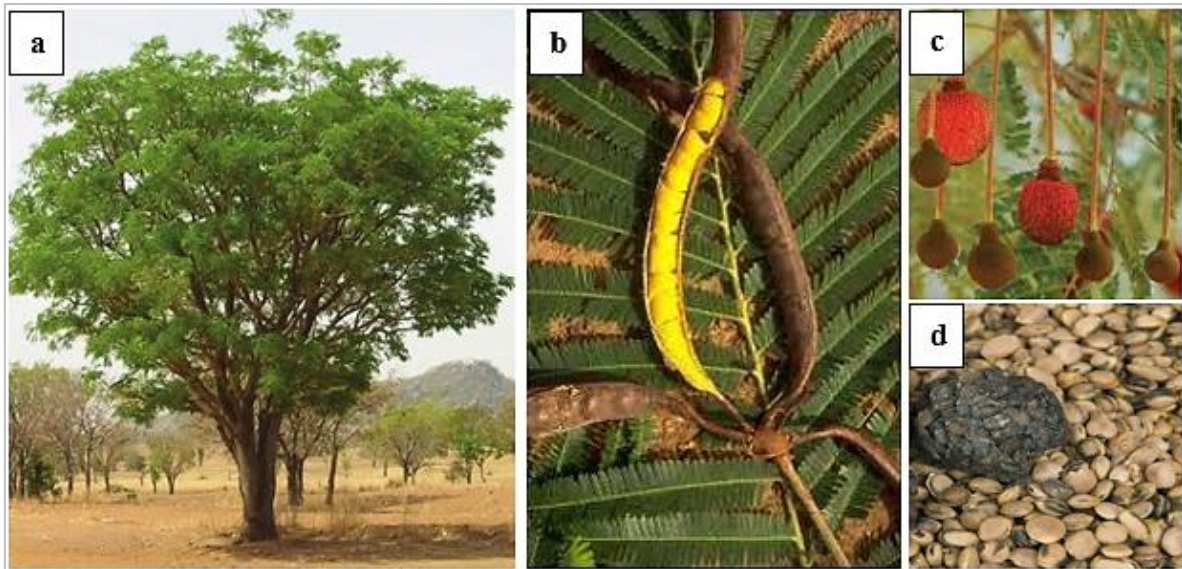


Figure 5: photos d'arbre et d'organes chez *Parkia biglobosa*.

a : arbre adulte, b : feuilles bipennées et fruits, c : inflorescences, d : graines.

(Source : Mabetty, 2018 ; PROTA, 2022)

Le genre *Parkia* comprend environ 30 espèces et a une répartition pantropicale. Il y a seulement 3 espèces du genre *Parkia* en Afrique continentale, et un quatrième à Madagascar. Les espèces de *Parkia* africaines semblent être étroitement apparentées. L'espèce *Parkia biglobosa* se trouve dans les savanes arborées de la région soudanienne, alors que les deux autres espèces africaines continentales (*Parkia bicolor* A.Chev. et *Parkia filicoidea* Welw. ex Oliv.) sont principalement des espèces de forêts pluviales (Sina, 1999 ; Lompo *et al.*, 2017 ; Houndonougbo *et al.*, 2020).

1.3.3. Répartition géographique et écologique

En Afrique, *Parkia biglobosa* est répandue dans la zone comprise entre 5°N et 15°N (Figure 6). Elle s'étend de la côte atlantique du Sénégal jusqu'au sud du Soudan et au nord de l'Ouganda. La zone est plus large en Afrique de l'Ouest (jusqu'à 800 km) et se rétrécit vers l'Afrique de l'est (Dotchamou *et al.*, 2016 ; Lompo *et al.*, 2017 ; Aborisade *et al.*, 2021). Des plantations expérimentales de néré ont été établies en Tanzanie et il a été introduit dans les Caraïbes il y a plus de 200 ans suite au commerce des esclaves ; puis plus tard en Guyane. Le néré est protégé et planté dans des champs agricoles et des terrains vagues dans les régions de savane. Il supporte une grande variété de conditions climatiques, la principale constante étant une saison sèche de 5 à 7 mois/an. Il peut pousser dans des régions à pluviométrie annuelle de 500 à 800 mm au Sahel, mais aussi souvent dans des régions à pluviométrie beaucoup plus

élevée (2200 mm) comme en Guinée-Bissau. Il a même été signalé dans des régions à plus de 3500 mm en Sierra Leone et 4500 mm en Guinée. Il préfère les régions avec une température annuelle moyenne de 26 à 28°C, mais supporte des températures plus basses et peut se trouver jusqu'à 1350 m d'altitude. Même s'il préfère les sols profonds bien drainés et fertiles. *Parkia biglobosa* se rencontre aussi sur des sols latéritiques peu profonds avec des pentes caillouteuses et des collines rocailleuses (Sina & Traoré, 2002 ; Mukhtar *et al.*, 2021).

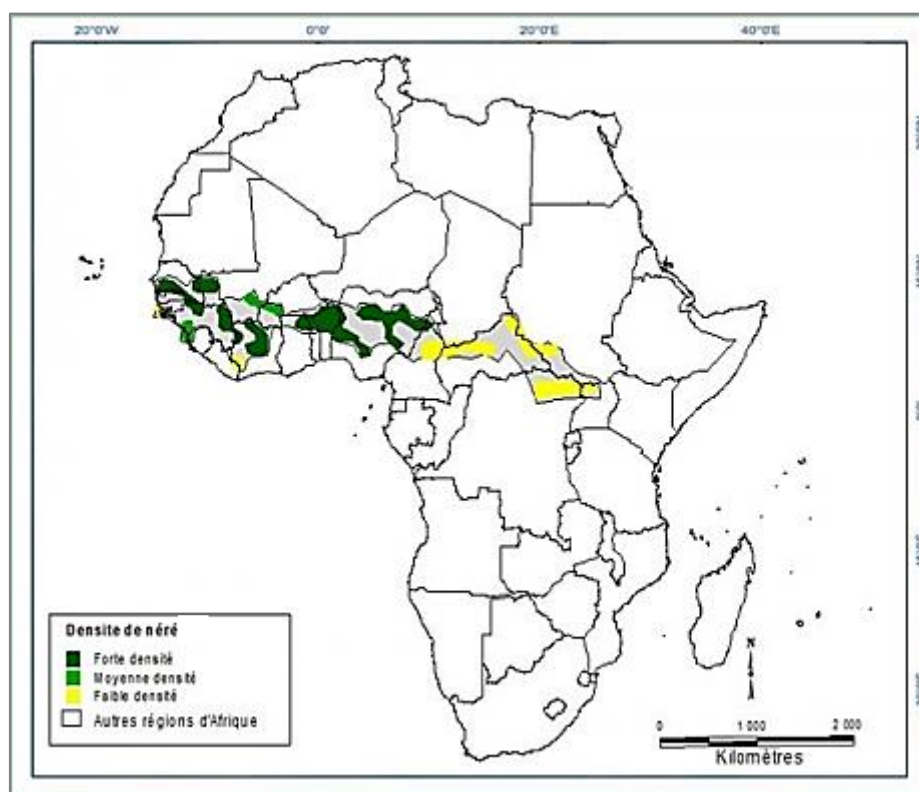


Figure 6: carte de répartition de *Parkia biglobosa* en Afrique

(Source : Mabetty, 2018)

1.3.4. Usages

Le Néré (*Parkia biglobosa*) est un arbre multifonctionnel qui est apprécié par les populations du Sahel. Les graines fermentées (“soumbala”, “dawadawa”, “nététu”) servent prioritairement de condiment pour assaisonner les sauces et les soupes. Les graines torréfiées sont utilisées comme un substitut du café connu sous le nom de “Sudan coffee” ou “café nègre”. Les graines pilées sont mélangées avec des feuilles de *Moringa oleifera* Lam. pour préparer une sauce, et elles sont également utilisées pour faire des beignets. La pulpe farineuse des fruits est consommée ou mélangée avec de l’eau afin de préparer une boisson sucrée et rafraîchissante riche en hydrates de carbone. Les gousses bouillies sont utilisées pour colorer la poterie en noir.

Les cendres sont appliquées comme mordant. L'écorce est riche en tanins et peut être utilisée pour le tannage des peaux. Le cuir qui en résulte est souvent d'une qualité moyenne qui est souvent rougeâtre, irrégulière et qui fonce lorsqu'elle est exposée à la lumière. Les feuilles sont quelquefois consommées comme légume, généralement après avoir été bouillies puis mélangées à d'autres aliments tels que de la farine de céréales. Les jeunes boutons floraux sont ajoutés à des salades mixtes (Avana-Tientcheu *et al.*, 2019 ; Termote *et al.*, 2020).

L'écorce, les racines, les feuilles, les fleurs, les fruits et les graines sont habituellement utilisés en médecine traditionnelle pour traiter une grande variété de maux, tant internes qu'externes, parfois en association avec d'autres plantes médicinales. L'écorce est l'élément le plus important utilisé en médecine, suivie des feuilles. Les applications médicales comprennent le traitement d'infections parasitaires, des maladies du système circulatoire, tels que l'hypertension artérielle, et des maladies du système respiratoire, du tube digestif et de la peau. En médecine vétérinaire, une décoction de racines est utilisée pour traiter la coccidiose chez les volailles. Les gousses vertes sont écrasées et jetées dans les rivières pour tuer les poissons. Le bois est adapté à la fabrication d'ustensiles de cuisine, tels que des mortiers, des pilons et des bols, des manches de houe et de pioche. Il est parfois utilisé pour la construction de maisons, principalement pour l'aménagement intérieur. Il est également utilisé comme bois de feu, et peut convenir à la production de papier. Les fibres des gousses (les cosses) et les racines sont utilisées comme éponge, cordes d'instruments de musique et pour la production de petits paniers. Le néré a la réputation d'améliorer le sol. Ses feuilles sont appliquées comme engrais vert. Il est également important en apiculture, car il offre une bonne source de nectar et convient à la mise en place de ruches. Il peut servir d'arbre décoratif sur des avenues (Ojewumi *et al.*, 2018 ; Musara *et al.*, 2020 ; Ajiboye & Hammed, 2020 ; Builders *et al.*, 2021).

1.3.5. Ressources génétiques

Le néré a une importance socio-économique considérable et pour cette raison son exploitation locale assez mal organisée mérite plus d'attention, comme d'ailleurs les initiatives pour améliorer ses produits (Sina & Traoré, 2002). Il faut par exemple développer des constitutions génétiques et la capacité de production des peuplements de *Parkia biglobosa* dans toute son aire de répartition afin d'avoir une bonne base de système de gestion durable, tout en tenant compte de la demande de ses produits.

Chapitre 2 : Généralités sur les concepts en architecture des plantes vasculaires

Ce chapitre a pour but d'établir un résumé non exhaustif des concepts majeurs en architecture végétale auxquels nous ferons référence au cours de ce travail. Il s'agit des critères de base et traits morphogénétiques couramment employés pour la caractérisation et l'analyse architecturale des végétaux.

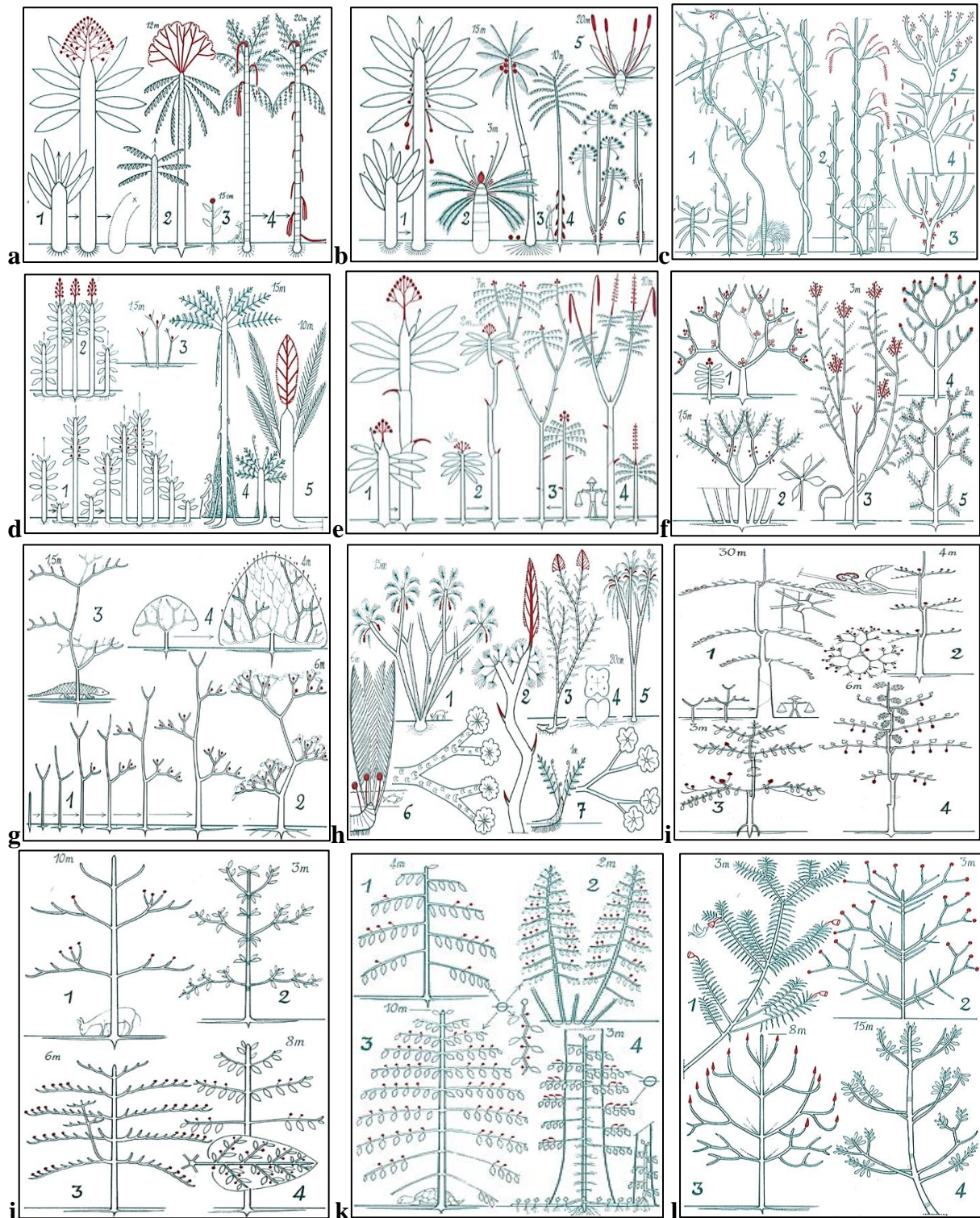
2.1. Concepts et définition de l'architecture des plantes vasculaires

L'architecture d'une plante peut être définie comme la nature et l'agencement topologique et géométrique relatif de chacune de ses différentes parties à un moment donné. Elle est le résultat d'un équilibre entre des processus de croissance endogènes et des contraintes extérieures exercées par le milieu (Barthélémy, 1991). L'analyse architecturale permet de révéler les caractéristiques endogènes du mode de développement de l'espèce et repose sur l'étude de groupes d'individus d'âges différents situés dans des environnements variés (Hallé *et al.*, 1978 ; Barthélémy, 1988). A partir de ces observations, l'analyse des caractères invariants permet de déduire la séquence de développement endogène de l'espèce et de comprendre de quelle manière cette séquence peut être modulée par l'influence du milieu. Depuis les premiers travaux initiés par Hallé et Oldeman en 1970, de nombreux concepts ont été développés, traduisant des événements fondamentaux intervenant au cours du développement des plantes (Nicolini, 1998 ; Sabatier, 1999 ; Heuret *et al.*, 2003).

2.2. Le modèle architectural

Le concept de « modèle architectural » (Hallé *et al.*, 1978 ; Hallé & Keller, 2019) a été élaborée à partir des observations, à divers stades de développement, de différentes espèces poussant dans des conditions de croissance favorables et non limitantes. Ces observations ont porté dans un premier temps sur des plantes des forêts tropicales, puis ont ensuite été étendues aux espèces d'autres régions bioclimatiques. Il correspond à la stratégie de croissance, de ramification et de floraison inhérente à l'espèce et représente l'expression de son programme de développement endogène : nature et séquence d'activité des processus morphogénétiques de l'organisme (Barthélémy *et al.*, 1989). La typologie des modèles architecturaux repose sur l'observation de quatre groupes principaux de caractères morphologiques : la croissance (rythmique ou continue), la ramification (absente ou présente, monopodiale ou sympodiale, rythmique, continue ou diffuse), la direction de croissance des axes (axes orthotropes, plagiotropes ou mixtes) et la position de la sexualité (terminale ou latérale). Chaque modèle

correspond à une combinaison particulière de ces caractères architecturaux. Il existe à ce jour 24 modèles architecturaux décrits pour l'ensemble du règne végétal (Hallé & Keller, 2019). Il s'agit du modèle de Holttum, de Corner, de Oldeman, de Tomlinson, de Chamberlain, de Leeuwenberg, de Schoute, de Koriba, de Prévost, de Fagerlind, de Petit, de Scarrone, de Stone, de Rauh, de Aubréville, de Attims, de Acosta, de Nozeran, de Massart, de Roux, de Champagnat, de Mangenot, de Troll et de Bell (Figure 7).



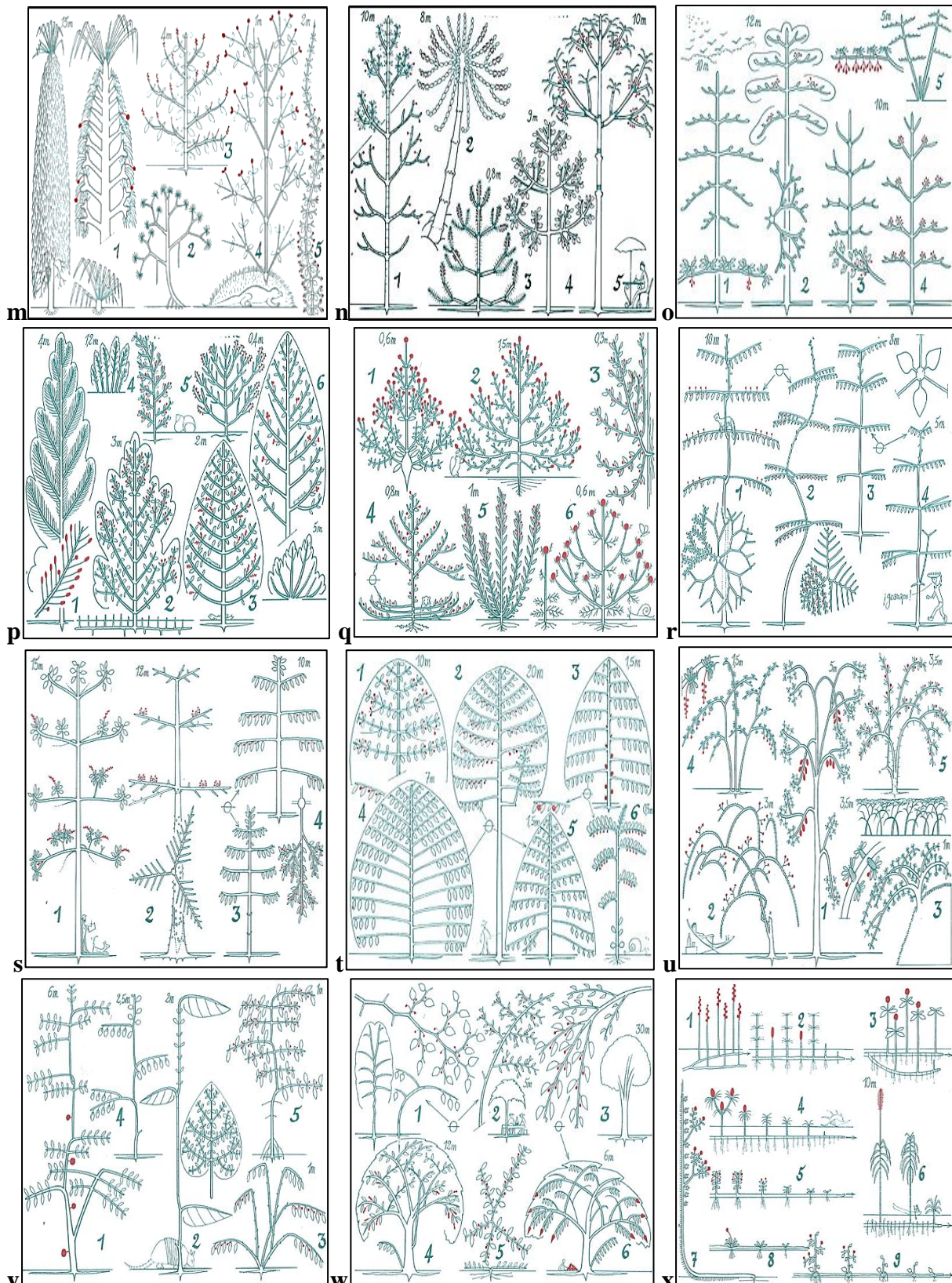


Figure 7 : images relatives aux 24 différents modèles architecturaux chez les végétaux

a :Holtum, **b** :Corner, **c** :Oldeman, **d** :Tomlinson, **e** :Chamberlain, **f** :Leeuwenverg, **g** :Schoute,
h :Koriba, **i** :Prévost, **j** :Fagerlind, **k** :Petit, **l** :Scarrone, **m** :Stone, **n** :Rauh, **o** :Aubréville, **p** :Attims,
q :Acosta, **r** :Nozeran, **s** :Massart, **t** :Roux, **u** :Champagnat, **v** :Mangenot, **w** :Troll, **x** :Bell

(D'après Hallé & Keller, 2019)

2.3. Unité architecturale

Le modèle architectural représente une stratégie globale de la plante mais s'appuie sur des caractères trop généraux pour qualifier l'architecture d'une espèce et la différencier de celle d'individus d'autres espèces. Pour une espèce donnée, l'expression spécifique du modèle architectural correspond à son « diagramme architectural » (Edelin, 1977), appelé aujourd'hui « unité architecturale » ou « architecture élémentaire » (Barthélémy *et al.*, 1989). Une plante peut être vue comme un système ramifié, fortement hiérarchisé, au sein duquel les axes peuvent être groupés en catégories (relativement petit et généralement inférieur ou égal à 5).

Chaque catégorie d'axes est définie par ses caractéristiques fonctionnelles, anatomiques et morphologiques (âge physiologique donné) puis sa position architecturale. L'unité architecturale correspond ainsi à la structure élémentaire spécifique de chaque plante (Barthélémy & Caraglio, 2007). Lorsque la plante a édifié son unité architecturale, elle possède une structure bien hiérarchisée au sein de laquelle toutes les catégories potentielles d'axes se sont exprimées. Leurs caractéristiques morphologiques peuvent néanmoins évoluer au cours des phases ultérieures du développement de la plante (Nicolini, 1998). Par exemple, certaines espèces fleurissent pour la première fois quand elles ont exprimé leur unité architecturale (Barthélémy *et al.*, 1997), alors que la floraison d'autres espèces est liée à un stade de développement ultérieur (Sabatier & Barthélémy, 1999). Le résultat peut être résumé dans un tableau accompagné d'un diagramme (Figure 8). Les différences entre les espèces résultent du nombre, de la nature et de la position relative des différentes catégories d'axes identifiées (Barthélémy *et al.*, 1997). Les premières étapes de développement d'un arbre donnent naissance à un système fortement hiérarchisé autour d'un axe vertical. Pour chaque espèce, une architecture élémentaire est définie par l'unité architecturale, composée d'un nombre fini de catégories d'axes (Barthélémy & Caraglio, 2007). Chaque catégorie regroupe des axes ayant des propriétés fonctionnelles et morphologiques identiques. Ainsi une structure végétale complexe se décompose finalement en un petit nombre de catégories d'axes qui s'empilent selon des règles botaniques. Le rassemblement des phytomères en catégories d'axes ramifiés permet une importante factorisation en sous-structures se répétant de nombreuses fois dans la structure principale (De Reffye *et al.*, 2018).

Par ailleurs, la différence entre les catégories d'axe est possible grâce à l'analyse rétrospective le long des axes dans l'architecture de la plante. Cette analyse permet via des marqueurs morphologiques laissés par les arrêts de croissance dus aux saisons sèches de

retracer la croissance passée des arbres (Nicolini *et al.*, 2012). Dans plusieurs cas, elle est utilisée pour la description phénotypique et pour le diagnostic de l'état des arbres dans un milieu donné tout en permettant d'appréhender les effets génotype et environnement. Elle permet aussi de reconnaître des traits architecturaux et de sélectionner des génotypes d'individus résilients et d'environnements favorables à la culture (Sabatier, 1999 ; Sabatier *et al.*, 2014). C'est d'ailleurs ce qui justifie son implication dans la présente étude.

A		
A1 (tronc)	A2 (branches)	A3 (rameaux)
Orthotrope vertical	Orthotropes redressées s'affaissant avec l'âge	Orthotropes dressés à pendants
U.C. longues Phyllotaxie opposée décussée	U.C. de taille moyenne Phyllotaxie opposée décussée	U.C. courtes Phyllotaxie opposée décussée
Abondamment ramifié	Moyennement ramifiées	Non ramifiés
Ne s'élague pas	Elagage à long terme	Elagage à moyen terme
Porte la sexualité	Porte la sexualité	Porte la sexualité

B

Figure 8 : exemple d'unité architecturale.

Tableau (A) et schéma récapitulatif (B) des caractéristiques des différentes catégories d'axes (A1, A2, A3) de l'unité architecturale du Frêne commun, *Fraxinus excelsior* L., Oleaceae. UC : unité de croissance

(Source : Barthélémy *et al.*, 1997)

2.4. La réitération

Certaines plantes peuvent rester conformes à leur unité architecturale durant toute leur vie tandis que d'autres peuvent paraître plus complexes et beaucoup plus ramifiées. Dans ces cas, une analyse minutieuse révèle que cette complexité ne provient pas de l'apparition de nouvelles catégories d'axes, mais d'une duplication des catégories d'axes déjà existantes. Cette duplication de tout ou partie de l'architecture de l'arbre a été appelée « réitération » par (Oldeman, 1974) et la partie dupliquée est appelée « complexe réitéré » (Hallé *et al.*, 1978). La réitération est respectivement qualifiée de « totale » ou « partielle » si c'est respectivement la totalité ou seulement une partie de l'unité architecturale qui est dupliquée. La réitération qui résulte du développement d'un bourgeon latent est qualifiée de « différée » tandis que la réitération qui se met en place à partir d'un méristème déjà existant et fonctionnel est qualifiée

d'« immédiate ». Il existe également différents types de réitération en fonction de leur déterminisme supposé. La réitération « traumatique » correspond au développement d'un complexe réitéré à la suite d'un traumatisme subi par la plante ce qui permet à l'arbre de « régénérer » la partie blessée (Hallé *et al.*, 1978). La réitération « adaptative » désigne tout type de réitération occasionnelle résultant d'une réaction de la plante à des modifications des conditions du milieu. A l'opposé de ces deux types de réitération plutôt opportunistes, la réitération « séquentielle » définit un phénomène inéluctable s'exprimant de façon automatique au cours du développement de tous les individus (Nicolini, 1998). Dans ce cas, la réitération est totalement intégrée à la séquence de développement de la plante (Figure 9). Au cours du vieillissement de la plante, la taille des complexes réitérés se réduit progressivement (Nicolini, 1998). L'expression de l'architecture élémentaire spécifique évolue alors vers une structure réduite et simplifiée (Figure 9a). La structure ultime ou miniature de l'unité architecturale a été définie comme « unité architecturale minimale » (Barthélémy, 1991).

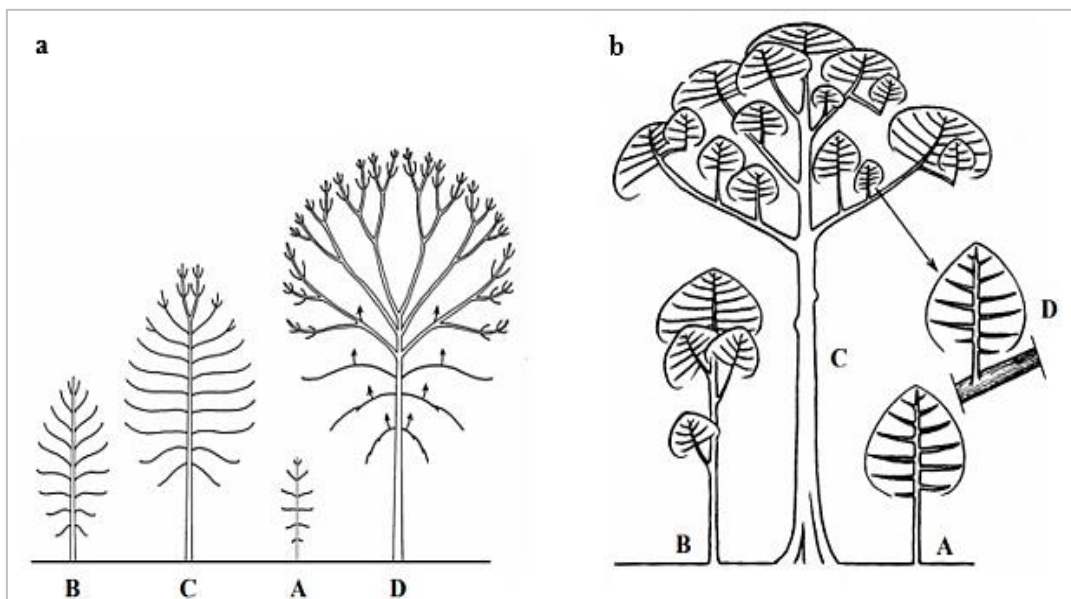


Figure 9 : schémas relatifs à la réitération

a : Séquence de développement du Frêne commun, *Fraxinus excelsior* L. (Oleaceae); (A) le jeune arbre, (B) l'arbre conforme à son unité architecturale, (C) l'arbre et la mise en place de la cime par réitération immédiate et séquentielle, (D) l'arbre adulte et la diminution de taille des complexes réitérés successifs dans la cime, les axes ultimes ne sont pas représentés ; **b** : Séquence de développement de *Shorea stenoptera* Burck. (Dipterocarpaceae) ; (A) stade de l'unité architecturale, (B) édification de la cime par réitération (réitération différée séquentielle), (C) l'arbre adulte peut être considéré comme une colonie de complexes réitérés, un complexe réitéré (D) est similaire à la jeune plante (A).

(Source : Barthélémy *et al.*, 1997)

2.5. Critères utilisés dans l'analyse architecturale

Le développement d'une plante est le résultat de deux processus élémentaires, la croissance et la ramification, dont chacun correspond à une activité méristématique particulière. L'analyse architecturale tient compte de ces processus et est fondée sur l'observation des critères morphologiques suivants (Edelin, 1984 ; Barthélémy, 1988) :

- la phyllotaxie, c'est la disposition des feuilles le long d'un axe. Lorsqu'une seule feuille est portée à chaque nœud, la phyllotaxie est qualifiée d'« alterne » ; si les feuilles successives sont positionnées dans un même plan et qu'elles forment deux à deux un angle de 180°, la phyllotaxie est qualifiée d'« alterne distique » ; à l'inverse, si les feuilles sont disposées dans plusieurs directions autour de l'axe selon une spire virtuelle unique la phyllotaxie est qualifié d'« alterne spiralée » ; lorsque plusieurs feuilles sont insérées à un même nœud la phyllotaxie est qualifiée de « verticillée ». Un cas particulier de la phyllotaxie verticillée est la phyllotaxie « opposée » où deux feuilles sont insérées à un même nœud. Avant d'éventuelles torsions secondaires des entre-nœuds, les feuilles d'une paire donnée s'insèrent toujours dans un plan perpendiculaire à celui formé par les feuilles du nœud précédent ou suivant, on parle ainsi de phyllotaxie « opposée décussée » (Caraglio & Barthélémy, 1997).

- le mode de croissance, c'est la croissance primaire d'une tige. C'est le résultat de deux mécanismes que sont l'organogenèse et l'allongement. L'organogenèse est la phase de division et de différenciation cellulaire, induisant l'initiation de nouveaux éléments au niveau de l'apex de la tige. L'allongement, ou phase d'augmentation de la taille des cellules, se manifeste essentiellement par l'allongement des entre-nœuds et des feuilles (Caraglio & Barthélémy, 1997). La croissance peut présenter une alternance régulière de phases d'allongement et de repos (« croissance rythmique ») ou non (« croissance continue »). Pour décrire la croissance rythmique d'une tige, Hallé & Martin (1968) ont défini : « l'unité de morphogenèse » comme la portion de tige initiée par le méristème apical durant une phase d'organogenèse continue et « l'unité de croissance » comme la portion de tige mise en place au cours d'une phase d'allongement continue. La croissance est dite « indéfinie » quand le méristème apical de l'axe feuillé fonctionne indéfiniment, et « définie » quand le méristème apical de l'axe feuillé se transforme et cesse de fonctionner à un moment donné ;

- le mode de ramification, c'est le résultat de la division du méristème terminal en plusieurs parties chacune édifiant un nouvel axe (« ramification terminale ») ou, dans le cas le plus fréquent, à partir d'un méristème axillaire (« ramification latérale ») (Figure 10). Les zones

ramifiées peuvent être régulièrement (« ramification rythmique ») ou irrégulièrement (« ramification diffuse ») espacés sur l'axe porteur. La ramification est dite « continue » lorsque tous les méristèmes axillaires d'une tige donnent naissance à un rameau (Figure 10). Le mode de ramification peut résulter du fonctionnement indéfini (« ramification monopodiale ») ou défini (« ramification sympodiale ») de l'ensemble des méristèmes d'un même système ramifié (Figure 10). Les plantes à ramification sympodiale se construisent par « une succession d'axes à croissance définie, qualitativement équivalents, appelés « modules » (Caraglio & Barthélémy, 1997). Un module, initialement nommé « article », est un axe feuillé dont la croissance est définie par la transformation de son méristème édificateur en vrille, en épine, en fleur, en inflorescence ou par la parenchymatisation de son méristème édificateur (Hallé *et al.*, 1978). En fonction du moment de développement des rameaux par rapport à l'initiation des méristèmes axillaires, deux principaux modes de ramification ont été identifiés (Hallé *et al.*, 1978). Le développement d'un rameau latéral a été ainsi qualifié « de différé ou d'immédiat selon qu'il fait suite ou non à une phase de repos après l'initiation du méristème latéral » (Caraglio & Barthélémy, 1997) ;

- Position des rameaux sur la pousse, c'est lorsque les rameaux se développent préférentiellement en position apicale, médiane ou basale sur la pousse annuelle. Ces positions définissent respectivement les notions « d'acrotonie », de « mésotonie » et de « basitonie » qui avaient, initialement, été associées à un gradient de vigueur décroissant ou croissant (Caraglio & Barthélémy, 1997). De manière similaire, « l'épitonie », « l'amphitonie » et « l'hypotonie » sont définies comme le développement préférentiel de rameaux vigoureux respectivement sur la face supérieure, latérale ou inférieure d'une branche horizontale, oblique ou inclinée (Caraglio & Barthélémy, 1997).

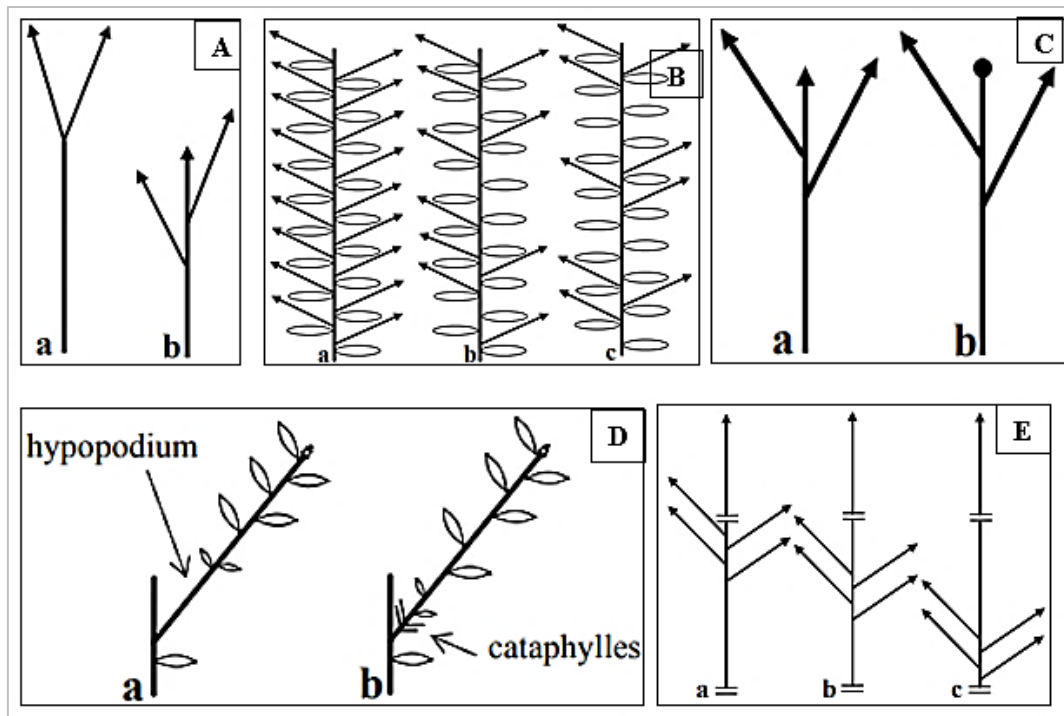


Figure 10 : représentation schématique de diverses modalités de ramification chez les plantes.

A : ramification terminale (**a**) et ramification latérale (**b**) ; **B** : ramification continue (**a**), ramification diffuse (**b**) et ramification rythmique (**c**) ; **C** : ramification monopodiale (**a**) et ramification sympodiale et axe à croissance définie (**b**) ; **D** : rameau à développement immédiat (**a**) et rameau à développement différé (**b**), L'hypopodium correspond au premier entre-nœud long ; **E** : position acrotone (**a**), mésotone (**b**) et basitone (**c**) des rameaux sur la pousse, (=) : arrêt de croissance.

(Source : Sabatier, 1999)

– la différenciation morphologique des axes, c'est la direction préférencielle des axes. Les axes « orthotropes » ont une direction de croissance verticale et une symétrie radiale, tandis que les axes « plagiotropes » ont une direction de croissance horizontale ou oblique et présentent une symétrie dorsi-ventrale. Les axes « mixtes » possèdent une direction de croissance orthotrope puis plagiotrope (Barthélémy & Caraglio, 2007) ;

– la position de la sexualité, elle est soit latérale ou terminale. La sexualité latérale ne modifie pas le développement de la plante tandis que la sexualité terminale bloque la croissance d'un axe végétatif. Le développement de cet axe fleuri se poursuit par la mise en place de relais.

- Préformation et néoformation, c'est la qualification des rapports entre l'organogénèse et l'allongement des tiges chez les plantes à croissance rythmique. Selon que la portion de tige émise est ou n'est pas présente à l'état d'ébauches dans le bourgeon avant que celui-ci ne débouffe, cette portion de tige est qualifiée de préformée ou de néoformée (Hallé *et al.*, 1978). En fonction de l'origine des organes foliaires émis, trois types d'unité de croissance peuvent se

rencontrer. Ce sont, des unités de croissance entièrement préformées, des unités de croissance avec une partie préformée et une partie néoformée et des unités de croissance entièrement néoformées (Hallé *et al.*, 1978).

2.6. Niveaux d'organisation

Le développement d'une plante est assuré par les processus de croissance, de ramification et de réitération qui conduisent à la duplication de structures botaniques élémentaires. Le nombre de ces entités botaniques est réduit et on distingue couramment, du plus simple au plus complexe, le métamère, l'unité de croissance, la pousse annuelle, le module, l'axe, l'unité architecturale, l'arbre entier qui traduisent autant de niveaux d'organisations emboîtés les uns dans les autres (Barthélémy, 1991) (Figure 11). La présence de ces différents niveaux d'organisation dépend du mode du développement de la plante. L'arbre entier peut correspondre à l'unité architecturale en l'absence de réitération dans le cas d'un sapin ou bien être considéré comme une colonie de complexes réitérés chez le chêne adulte où la réitération est séquentielle. Un axe peut être constitué d'une succession de modules dans le cas d'une croissance définie, d'une succession de pousses annuelles ou d'unités de croissance si la croissance est indéfinie et rythmique ou d'une succession de métamères si la croissance est continue et indéfinie.

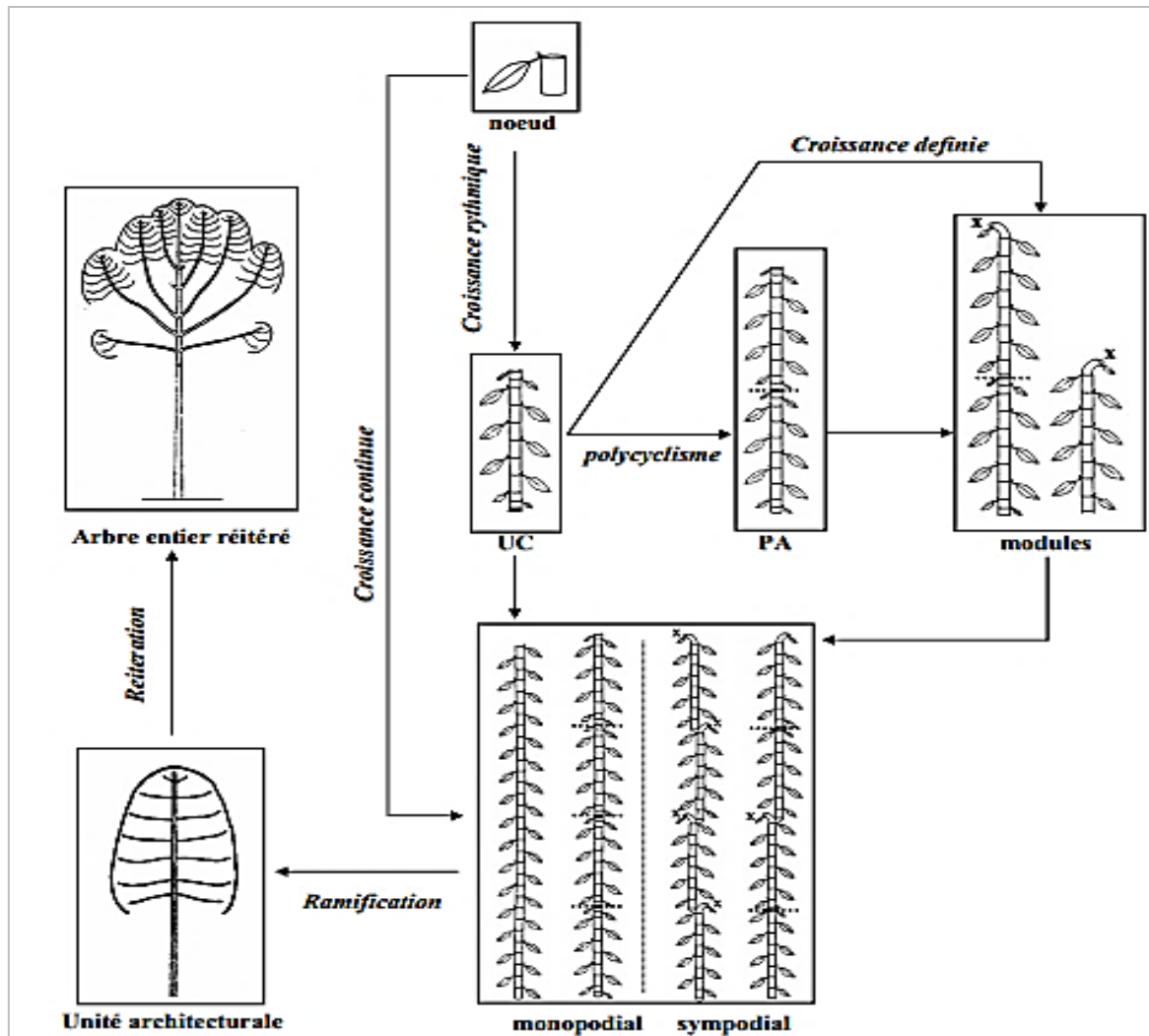


Figure 11 : schématisation du niveau d'organisation et phénomènes de répétition chez les Phanérogames.

Les niveaux d'organisation sont le métamère, l'unité de croissance, la pousse annuelle, le module, l'axe, l'unité architecturale et l'arbre entier. Les phénomènes de répétition sont la croissance, la ramification, et la réitération. **UC** = unité de croissance, **PA** = pousse annuelle.

(Source : Barthélémy, 1991)

2.7. Gradients morphogénétiques

Les caractéristiques des entités botaniques élémentaires dupliquées par les processus de croissance, ramification, réitération évoluent au cours d'une séquence de différenciation. Ces changements peuvent être de nature qualitative et/ou quantitative et s'expriment de manière continue et graduelle des niveaux d'organisation les plus élémentaires aux plus englobants. Les gradients principaux présents chez la majorité des végétaux vasculaires sont présentés par la figure 12 (Barthélémy *et al.*, 1997).

Les gradients morphogénétiques sont caractérisés par trois critères, que sont :

- « L'effet de base » : il correspond à une augmentation progressive de la vigueur des entités botaniques successivement émises après la germination au cours de la phase d'établissement de la plante (Barthélémy *et al.*, 1997 ; Nicolini, 1998) ;
- La « dérive » : elle correspond au vieillissement du méristème édificateur et se traduit par une perte de vigueur des entités botaniques successivement émises par celui-ci sur un axe âgé (métamère, unité de croissance ou pousse annuelle, module etc.) ;
- L'« ordre de ramification » : le premier axe issu de la graine correspond à l'ordre 1, tandis que les axes portés par celui-ci sont qualifiés d'ordre 2 et ainsi de suite. L'effet de l'ordre de ramification se traduit souvent par la diminution de la vigueur des entités botaniques de l'ordre 1 vers les ordres élevés (Barthélémy *et al.*, 1997). La notion d'ordre de ramification ne doit pas être confondue avec la notion de catégorie d'axe utilisée pour l'unité architecturale.

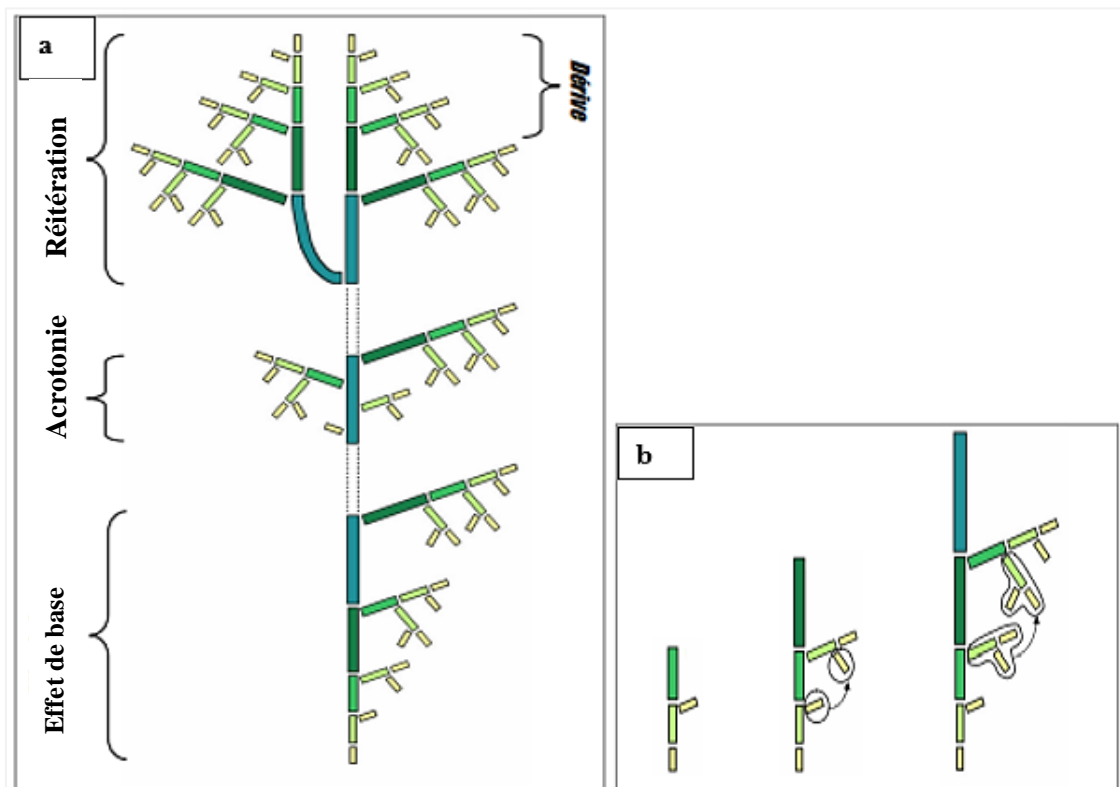


Figure 12 : schématisation des gradients morphologiques chez les plantes

a : représentation théorique de la répartition d'entités botaniques ayant les mêmes caractéristiques morphologiques en fonction de quatre gradients morphogénétiques : l'effet de base, l'acrotonie, la réitération et la dérive. Chaque rectangle correspond à une entité, les entités de la même couleur et de même taille possèdent des caractéristiques morphologiques équivalentes. **b** : le développement par intercalation (Edelin, 1977) ; la morphogenèse du système ramifié se fait par intercalation de nouvelles structures au cœur même de son architecture ; les premières structures apparues sur le tronc sont ainsi « repoussées » à la périphérie sur les branches suivantes.

(Barthélémy *et al.*, 1997)

Chapitre 3 : concept, présentation et calibration avec le modèle GreenLab

La compréhension et la prédiction du fonctionnement des plantes en peuplement se heurtent à la quasi-impossibilité de mesurer les variables d'état de l'ensemble des structures tels que l'éclairement des feuilles, l'assimilation carbonée, les puits de carbone, etc. La modélisation FSPM (Functional-Structural Plant Model) pallie ce manque d'information par simulation en utilisant divers modules pour calculer les processus qui déterminent le fonctionnement des plantes, tels que l'interception de la lumière, l'assimilation carbonée ou encore la production de biomasse et les rendements. Les multiples fonctions et avantages de la modélisation des plantes (prédiction de rendement, sélection génétique, optimisation de cultures etc.) lui confère un caractère incontournable aujourd'hui pour les chercheurs.

Dans ce chapitre, nous abordons et présentons les contours et concepts de la modélisation des plantes afin d'essayer de la comprendre.

3.1. Modélisation des plantes

Grâce à la modélisation mathématique, l'architecture et le fonctionnement des plantes peuvent être mis en équation. Dans cette thèse, l'étude de la modélisation sera une analyse par méthodes d'observation in situ des liens de l'expression de l'architecture de *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* et *Parkia biglobosa*. Cette méthode permettra de déterminer pour ces espèces, les paramètres qui ne peuvent pas être directement mesurés sur ces plantes (la force de puits des organes) utiles pour leur amélioration génétique et l'optimisation de leur culture. Ce qui justifie le choix pour cette étude, en effet ce type d'approche n'a jamais été développé sur les espèces forestières en Côte d'Ivoire.

3.1.1. Concept et définition

Contrairement à la physique, la biologie n'a pas engendré beaucoup de modèles mathématiques, et encore, ceux-ci sont apparus avec deux siècles de retard. Seuls les modèles de la génétique initiés par Mendel puis développés par Morgan ont pris le statut de modèles mathématiques en constituant la *génétique quantitative*. La biologie était donc avant tout une affaire d'érudition, plutôt qu'une affaire de calculs (De Reffye *et al.*, 2010). Ce n'est que récemment, à la fin du XXe siècle, que la modélisation de la croissance des plantes avec l'architecture comme support du fonctionnement a vraiment commencé. La modélisation des plantes est l'expression mathématique des phénomènes biologiques tout en permettant de mettre en équation l'architecture et le fonctionnement des plantes. Cette modélisation intégrée

du développement architectural, du fonctionnement écophysologique et du comportement biomécanique des plantes, constitue une méthode meilleure pour explorer les interactions entre le déterminisme génétique et la régulation environnementale de leur croissance. Elle permet de prédire l'impact des modes de conduite sur la production végétale, en quantité et en qualité (Dauzat *et al.*, 2001).

3.1.2. Les types de modèles de plantes

Les modèles de plantes sont de plusieurs types. En fonction de leur évolution progressive au cours du temps, l'on trouve :

-les modèles botaniques ou les modèles de l'architecture des plantes (résultat de l'organogenèse des méristèmes qui caractérise la cinétique de la mise en place des axes feuillés d'un arbre) initiés par les botanistes Hallé & Oldeman en 1970 ;

-les modèles de la production végétale en agronomie (PBM) dont les pionniers sont les Hollandais avec pour paternité Wit dans les années 1970 (Figure 13b) ; ces modèles s'intéressent qu'à la production végétale au niveau du m² en fonction des paramètres environnementaux (lumière, température, eau, azote...). La plante n'est plus considérée individuellement, ce qui compte ici c'est la surface foliaire/m² (LAI) et la production végétale/m² qui est généralement divisée en compartiments (feuilles, entre-nœuds, fruits, racines.). Tous ces compartiments se partagent un pool commun de biomasse selon leur force de puits. À ce niveau macroscopique, les agronomes ont montré que la production était liée étroitement à l'énergie utile de la lumière incidente (le PAR), à la lumière interceptée par le couvert et à un facteur de proportionnalité qui est l'efficacité de la lumière (la LUE). L'interception de la lumière est modélisée par la loi de Beer-Lambert : $I=(1-\exp(-k.LAI))$ (1) et la production d'un mètre carré (m²) de culture est donnée par la formule : $Q=LUE*PAR*(1-\exp(-k.LAI))$ (2) avec k comme coefficient empirique dépendant des propriétés du couvert qui vaut environ 0,7 en moyenne (De Reffye, 2009) ;

-les modèles d'arbres ou modèles dynamiques des peuplements forestiers, qui peuvent expliquer la structure des arbres individuels ou non (Feng *et al.*, 2012). Ces modèles visent à évaluer la production de biomasse à l'échelle du peuplement, sur la base de processus écophysologiques. Les modèles de peuplement forestiers incluent généralement une description très simple de la structure de la plante, le tronc est décrit essentiellement par le diamètre et la hauteur. Dans certains cas, la forme de la couronne de vie est comprise. La

distribution de branche le long de la tige est parfois ajoutée, mais n'est généralement pas liée au développement. La biomasse peut être attribué aux compartiments couronne, tronc et racines. La structure arborescente est rarement représentée à l'échelle de pousses individuelles (De Reffye *et al.*, 2008). Aujourd'hui, il est de plus en plus important de prendre en compte l'arborescence individuel dans la gestion forestière pour des objectifs différents, y compris l'allocation de carbone par exemple et la séquestration (Melson *et al.*, 2011). Avec l'amélioration des connaissances scientifiques et la capacité de calcul accrue, en collaboration avec l'exigence de représentations plus détaillées, les modélisateurs forestiers cherchent à inclure une sorte de représentation de la structure de chaque arbre (Le Roux *et al.*, 2001). Les modèles d'arbres particuliers sont généralement classés en trois catégories principales : les modèles morphologiques, architecturaux et structure-fonctions.

- les modèles morphologiques ou géométrique (GM) ; Ces modèles visent à simuler l'arborescence sans tenir compte des processus de développement. L'objectif principal est d'obtenir des formes d'arbres réalistes pour être utilisés par exemple dans l'infographie. Dans ces modèles, le méristème virtuel de production est contrôlé par un ensemble de règles qui peuvent mener à divers modèles de ramification et le temps précis de connaissances botaniques sur l'architecture d'arbre n'est pas nécessaire. On a par exemple Xfrog (Deussen & Lintermann, 2005), OnyxTree (Bosanac & Zanchi, 2002), etc
- les Modèles architecturaux (Figure 13a) qui visent à simuler la dynamique du développement de l'arborescence, ce qui inclut à la fois la topologie et la géométrie, en intégrant les processus architecturaux qui influencent la dynamique de la structure (processus endogènes inhérents à chaque espèce et les contraintes exogènes exercées par l'environnement). Ils sont une extension des modèles architecturaux initiaux décrits par Hallé *et al.* (1978). On a par exemple AMAPsim (Barczy *et al.*, 2008).
- les Modèles fonctionnels de plantes-structurelles (FSPM) qui simulent le développement des plantes et la croissance régulée par des processus physiologiques, envisageant en général les compartiments sources et des puits (Figure 13c). Ici, le fonctionnement du méristème génère le développement de la structure de la plante en créant de nouveaux organes (qui jouent un rôle en tant que source et / ou un évier) et l'expansion des organes de la biomasse entrante génère la croissance des arbres (Vos *et al.*, 2007). Ces modèles sont toujours un défi important pour la recherche (De Jong & Da Silva, 2010). Peu de FSPMs détaillés existent pour les arbres forestiers en raison à

la fois de la complexité structurelle et le temps requis pour les simulations. Ce sont, LIGNUM, Archimed, GreenLab etc. (De Reffye *et al.*, 1991a ; Barczy *et al.*, 2008).

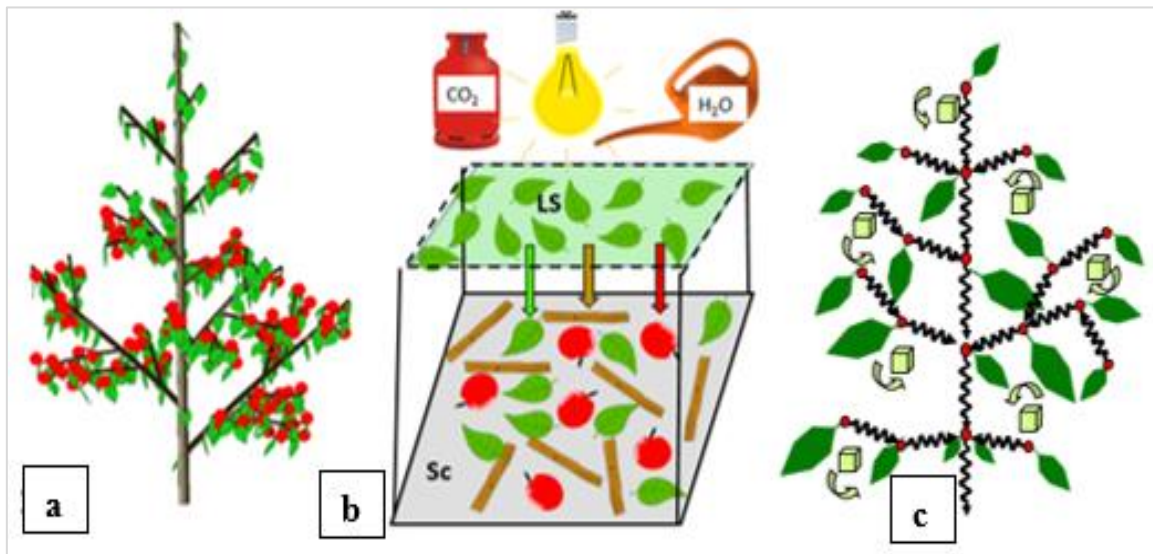


Figure 13 : schémas présentant les différents types de modèle.

Modèle architectural ou GM (a), modèle de culture ou PBM (b) et modèle structure-fonction ou FSPM (c).

(Source : De Reffye *et al.*, 2018)

3.2. Concept et présentation du modèle GreenLab

Dans la diversité des approches de modélisation de la croissance des plantes décrite ci-dessus, le choix de cette étude s'est orienté vers le modèle GreenLab qui permet d'accéder à une meilleure compréhension de l'architecture et de la croissance des végétaux pour leur amélioration et l'optimisation de leur culture. GreenLab est un modèle générique, structure-fonction qui travaille au niveau du phytomère inséré dans une architecture décrite finement au niveau botanique. Il permet de calculer les paramètres des lois de production d'organes issus des observations directes de l'architecture des plantes. A partir des paramètres de ces lois, il restitue la dynamique de la production de biomasse et de sa répartition dans la plante qui donne le volume des organes produits ; il prédit la production du végétal en calculant la biomasse nécessaire à l'expansion de ses organes ; il explique le fonctionnement des méristèmes de façon stochastique (De Reffye *et al.*, 2018). GreenLab donne le nombre d'organes associés à chaque cohorte qui se met en place. Ces derniers multipliés par les puits des organes correspondants donnent par sommation la demande de la plante (De Reffye *et al.*, 2012). L'accès rapide à l'estimation de cette dernière est un atout important dans le calcul de la production de la plante. L'identification des paramètres du modèle sur les plantes réelles (méthode inverse) est un enjeu

important, car ces paramètres sont des indicateurs utiles et des composantes du rendement utilisables par la suite en génétique (sélection végétale) ou en optimisation des itinéraires culturaux (irrigation, densité de culture) (De Reffye *et al.*, 2008 ; De Reffye *et al.*, 2012). Un point fort du modèle GreenLab réside justement dans l'application de cette méthode inverse. La simulation du modèle à partir des paramètres mesurés sur les plantes permet de restituer en 3D leur architecture (De Reffye *et al.*, 2012 ; 2021). Dans le modèle GreenLab, l'architecture de la plante est une sortie optionnelle de la simulation (simulation des variations physiologiques et géométriques des organes pendant la croissance et le développement). En général, le calcul de la production de la plante ne nécessite pas la définition géométrique de la structure, mais seulement de son développement et des relations sources-puits, ce qui fait gagner beaucoup de temps de calcul (De Reffye *et al.*, 2012).

3.2.1. Fonctionnement du modèle GreenLab

Il y'a trois processus qui caractérisent le fonctionnement du modèle, 1) l'activité stochastique des bourgeons qui est le fonctionnement originel de la plante et qui oriente sa structure dans un environnement donné ; 2) le développement qui établit la structure architecturale ; et 3) la croissance qui est la production de biomasse et de sa répartition dans la plante. Ces trois processus constituent trois étapes étroitement dépendantes et lié les unes aux autres selon les données de terrain.

3.2.1.1. Fonctionnement des méristèmes

La production d'entre-nœuds par le méristème est régie par deux phénomènes superposés mais identifiables, que sont la loi de l'élongation et celle de la cessation (flétrissement ou début de dormance). La loi de l'élongation est considérée en premier lieu. Les pousses sont suivies pendant toute leur période de croissance pour les plantes qui ont une croissance rythmique, ou pendant une période arbitraire pour les autres. Il est possible d'étudier la répartition des accroissements d'entre-nœuds entre des dates rapprochées et d'observer ainsi le phénomène de croissance pure. Cette procédure est basée sur l'hypothèse que la cessation est indépendante de la croissance (De Reffye *et al.*, 1991a). Les observations entre deux dates par d'entrenœud des processus de croissance et d'arrêt dans une population d'unité de croissance (UC) et de tiges donnent des distributions statistiques. Cette distribution statistique des entrenœuds qui est donnée par la combinaison des processus d'élongation et d'arrêt de croissance caractérise la croissance aléatoire des pousses. Les axes végétatifs équivalents dans un arbre fonctionnent selon les mêmes lois de probabilité. Il est possible de contrôler la

croissance d'un arbre à tous les niveaux en utilisant un très petit nombre de paramètres. Les lois de distributions de probabilités observées aux niveaux macroscopiques sont simples et ne dépendent pas nécessairement de la complexité des phénomènes sous-jacents. La méthodologie consiste à ajuster les histogrammes observés du nombre d'entre-nœuds par UC ou du nombre d'UC par tige aux distributions de probabilité théoriques produites. Le test du khi-carré permet de rejeter ou d'accepter ces ajustements. Plusieurs processus de base découlant de cette théorie sont utilisés comme référence dans l'analyse des croissances observées et modélisent des comportements très différents. Ce sont, le processus de poisson, le processus binomial, le processus de cessation, l'Arrêt exponentiel et géométrique puis la théorie du renouvellement (De Reffye *et al.*, 1991a).

L'objectif de la théorie du "renouvellement" est de compter les occurrences d'un certain phénomène pendant une période de temps fixe, étant donné que le temps entre deux occurrences successives (temps de renouvellement) est indépendant et suit la même loi de variation (loi inter-arrivée). La distribution du nombre de réalisations du phénomène pendant cette période est appelée "loi de comptage". Ici, le phénomène d'intérêt est la formation d'un phytomère par le méristème apical d'un axe foliaire, le temps inter-arrivée entre deux phytomères successifs est supposé suivre une certaine loi. Les résultats de la théorie du renouvellement montrent que la distribution du nombre de phytomères produits pendant une période T (notée NT), converge vers une distribution normale lorsque T augmente. Cette loi ne dépend que de la moyenne μ et de la variance σ^2 de la distribution du temps de renouvellement. Pour des valeurs suffisantes de T , selon la théorie du renouvellement, on peut faire l'approximation suivante pour la moyenne

$$M \text{ et la variance } V \text{ du nombre de phytomères produits : } M \approx \frac{T}{\mu}, V \approx T \frac{\sigma^2}{\mu^3} \quad (3)$$

La moyenne et la variance d'une loi binomiale $B(N, b)$ s'écrivent : $M = N \cdot b; V = N \cdot b \cdot (1 - b)$ (4) (Où N est le nombre d'essais et b est la probabilité de leurs succès).

En comparant les systèmes d'équations (3) et (4), il est facile d'établir que :

$$N \approx \frac{T}{\mu(1 - \frac{\sigma^2}{\mu^2})} \text{ et } b \approx 1 - \frac{\sigma^2}{\mu^2} \quad (5) \text{ « } N = T/\mu b \text{ »}$$

Ainsi, la loi binomiale $B(N, b)$ peut être considérée comme la distribution du processus de comptage avec un pas de temps discret appelé cycle de développement (CD). N étapes sont

réalisées, chacune avec une probabilité b à chaque CD (N est le nombre d'essais possible). Un tel processus est appelé "processus de Bernoulli". La simulation numérique des méristèmes donne donc des cycles qui produisent alternativement des entités phytomères (avec une probabilité b) et des entités vides (avec une probabilité $1 - b$), qui sont considérées comme des pauses dans le fonctionnement. L'utilisation de la théorie du renouvellement permet donc de passer du temps continu au temps discret avec une bonne approximation. En supposant que la distribution du nombre de phytomères produits par un même axe foliaire sur une période T donnée est approximée par une loi binomiale $B(N, b)$, on peut en déduire la durée moyenne du CD : $t_{CD} = \frac{T}{N}$ (6)

Ce modèle est en bon accord avec l'utilisation du temps thermique par rapport au temps calendaire (Figure 14). Le temps minimum entre les créations de deux phytomères successifs coûte 1 CD. Le nombre de CD, qui compte les entités phytomères et les pauses, est en relation linéaire avec le temps thermique. Le cas $\sigma^2 = \mu^2$ (qui correspond à la loi de Poisson) donnerait un nombre infini de CD.

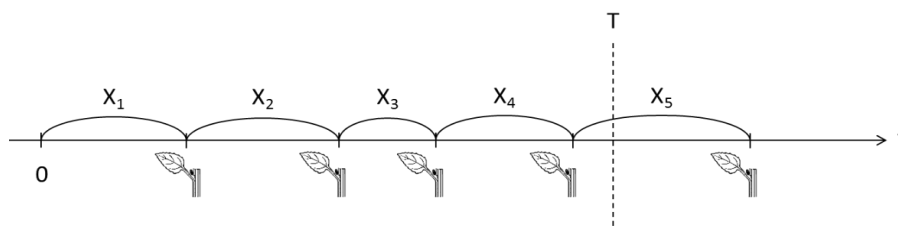


Figure 14 : schéma du modèle du processus de fonctionnement du renouvellement chez les plantes.

Les temps entre la formation de deux phytomères successifs forment une suite de variables aléatoires indépendantes (X_1, \dots, X_n, \dots) de même loi, de moyenne μ et de variance σ^2 . Le processus de comptage associé permet de dénombrer le nombre de phytomères NT produits sur la période $[0, T]$. Dans l'exemple ci-dessus, si l'on s'intéresse à cette période, on obtient $NT = 4$. La loi de cette variable NT peut être approximée par une loi binomiale ou normale.

L'approximation de la loi binomiale due à la théorie du renouvellement donne la probabilité (P) d'observer la réalisation d'un axe composé de K phytomères pour N cycles de développement, qui est : $P(X = K) = \binom{N}{K} b^K (1 - b)^{N-K}$ (7)

La distribution du nombre de phytomères par axe généré par un processus de Bernoulli au cycle N avec un paramètre b suit une loi binomiale positive $B(N, b)$:

Si l'on note X comme le nombre de phytomères produits par une simulation sur un axe, la probabilité que ce nombre soit K , est donnée par l'équation (7). Sa moyenne M et sa variance V sont : $M = N \cdot b$ et $V = N \cdot b \cdot (1 - b)$ (8)

La moyenne et la variance sont liées linéairement par la relation : $V = (1 - b) \cdot M$ (9)

Notons que le modèle s'applique avec des probabilités variables $b(i)$ en fonction des cycles. Dans ce cas, la moyenne et la variance respectives seront :

$$M(N) = \sum_{i=1}^N b(i) \text{ et } V(N) = \sum_{i=1}^N b(i) \cdot (1 - b(i)) \quad (10).$$

Au rang du phytomère $K1$ situé sous le sommet de la tige, l'âge chronologique (AC) d'un phytomère est distribué selon une loi binomiale négative $BN(K1, b1)$ où $b1$ est le paramètre du processus de Bernoulli (P) attribué au fonctionnement du méristème de la tige :

$$P(X = K1 + x) = \binom{K1+x}{x} \cdot b1^{K1} \cdot (1 - b1)^x \quad (11)$$

La loi binomiale négative (9) caractérise le nombre de tests $K1 + x$ nécessaires pour obtenir le nombre souhaité de succès $K1$. Ici, les tests correspondent aux cycles et les succès (en nombre $K1$) correspondent à la création des phytomères et les échecs (en nombre x) aux pauses. Le rang caractérise donc le nombre de succès (puisqu'il compte le nombre de phytomères réalisés) et les pauses (cachées) augmentent l'AC du phytomère apparu au rang $K1$: cet AC a évidemment un minimum $K1$ (il faut au moins $K1$ cycles pour construire $K1$ phytomères) et est tronqué avec l'âge de l'arbre en cycles. Une fois le AC de la branche $K2$ attribué ($K2 = K1 + x$), le nombre de phytomères de la branche va dépendre du processus de Bernoulli de paramètres ($K2, b2$). La distribution du nombre de phytomères des branches situées au rang $K1$ suit donc une loi composée de lois binomiales de paramètres ($K2, b2$). Si le rapport de rythme (w) est différent de 1, l'âge de la branche $K2$ doit être multiplié par w .

La loi de poisson est une approximation de la loi binomiale. Le processus de Poisson joue un rôle central dans la théorie des processus ponctuels de manière similaire à celui de la loi uniforme pour les probabilités finies dans la mesure où il représente la notion intuitive d'aléatoire non structuré. Cette notion peut être transcrite mathématiquement par deux hypothèses très naturelles. La première est l'homogénéité dans le temps ou "stationnarité", ce qui signifie qu'il existe un taux d'occurrence constant. La seconde est l'hypothèse d'indépendance selon laquelle le nombre d'événements se produisant pendant des périodes de temps disjointes sont indépendants (De Reffye *et al.*, 1991b). En conséquence de ces

hypothèses, ainsi que d'un certain nombre de conditions techniques, il est facile de montrer qu'à tout moment t , $N(t)$ est distribué par Poisson avec le paramètre Xt , où X est une constante appelée intensité du processus. Dans les UC ayant un nombre fini d'entre-nœuds, la connaissance du processus de croissance ne suffit pas à expliquer les distributions observées. Il faut également examiner la durée de la croissance, c'est-à-dire la loi de cessation. L'étude de celle-ci nécessite généralement des observations tout au long de la période de croissance de la plante. La distribution du nombre d'entre-nœuds aboutit à la composition du processus de croissance par la loi de cessation. En dehors du cas trivial d'arrêt simultané des méristèmes, la durée de croissance distribuée selon une loi exponentielle est le cas particulier le plus important. Ce modèle correspond à l'absence de vieillissement du méristème. Il est facile de montrer que bien que le processus d'élongation soit binomial ou de Poisson, la distribution résultante est géométrique dans les deux cas. Dans le cas d'une croissance binomiale, cela revient à raisonner en unités de dimension et à considérer que l'arrêt suit la distribution géométrique (De Reffye *et al.*, 1991b).

L'activité méristématique (actif ou dormant) construit les axes d'un arbre et cela est perceptible et identifiable par la distribution du nombre de phytomères dans l'unité de croissance, le nombre d'unité de croissance dans les axes et leur loi d'ajustements. La construction d'un phytomère et le passage d'un état à l'autre à un caractère aléatoire auquel est couplé une loi probabiliste qui évolue dans l'espace temporairement. La distribution finale du nombre de phytomères et d'unité de croissance est la composition du processus de développement et d'arrêt. Le modèle du développement se base sur les variations du nombre de phytomères d'axes identiques sur un temps fixe. Dans le modèle, le méristème subit des tests d'accroissement. A chaque test, un nœud est produit ou non avec une certaine probabilité. La dimension d'un axe est donnée par le nombre de test réalisé avec une taille qui est égale au nombre de tests réussis (nombre de nœud sur l'axe considéré). Le développement est décrit par un processus aléatoire : à chaque réalisation de test d'accroissement d'axe de dimension N , il est associé la probabilité b de réalisation d'un nœud, b étant l'activité du méristème.

En résumé, l'activité méristématique décrit un processus de Bernoulli et est calculé selon une loi composée de Binomiale positive (B), Binomiale négative (BN) et une probabilité (a) liant les deux processus stochastiques (Figure 15). La Binomiale positive est contrôlée par la préformation d'organes (phytomères et UCs) dans les bourgeons. La Binomiale négative est contrôlée par la néoformation d'organes par les méristèmes. Lorsque l'activité méristématique est répartie sur un intervalle de temps court, la loi de distribution est une binomiale positive

$B(K, b)$ de formule $P(X = K) = \binom{N}{K} b^K (1-b)^{N-K}$ (7). Si l'activité méristématique est étalée dans le temps, la loi de distribution est une binomiale négative $BN(Kl, b_l)$ de formule $P(X = K_l + x) = \binom{K_l+x}{x} \cdot b_l^{K_l} \cdot (1-b_l)^x$ (11).

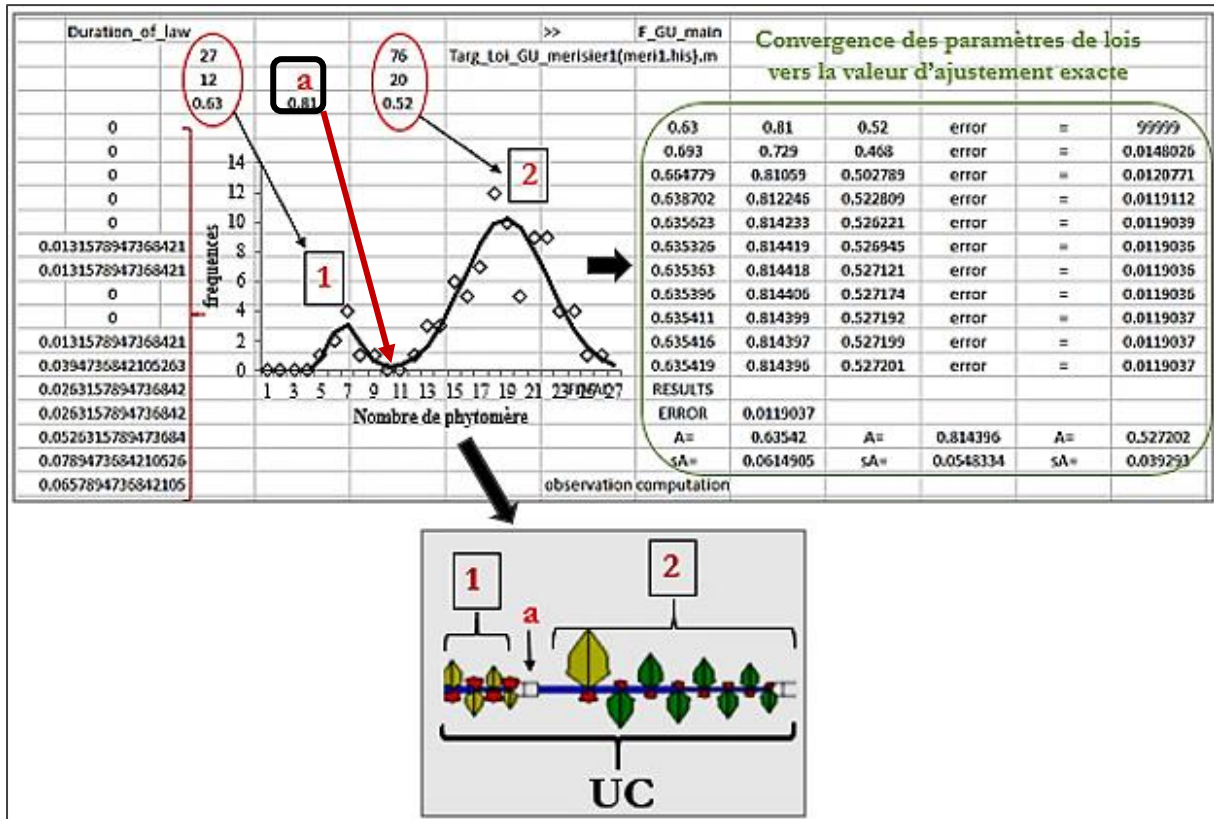


Figure 15 : analyse du fonctionnement d'un méristème avec GLOUPS_Fit_GU_main implémenté dans MATLAB

Exemple d'une unité de croissance « UC » simulée du cerisier : $B(12, 0.63)$, $a = 0.81$, $BN(20, 0.52)$.

(Source : De Reffye *et al.*, 2018)

Notons que si la préformation ne dépasse pas douze phytomères, la néoformation peut dépasser cinquante phytomères (cas de l'abricotier). Le pic de la préformation dans la distribution bimodale est d'autant plus visible que peu d'UC produisent une partie néoformée, il disparaît si toutes les UC font de la néoformation (cacaoyer). Plus l'âge physiologique est grand, moindre est la proportion de néoformation. Dans ce cas le paramétrage des unités de croissance avec néoformation nécessite les cinq paramètres utilisés dans la méthodologie de cette étude : N_1, b_1, a, N_2, b_2 qui désigne les lois binomiales (N, b) des parties pré et néoformées et la proportion a de néoformation. B est le cas d'une binomiale positive et BN le cas d'une binomiale négative. Ces distributions sont caractéristiques de l'espèce d'arbre considéré.

3.2.1.2. Paramètres de développement

Dans le modèle GreenLab, le développement des plantes est établi à l'aide de sept paramètres, dont la majorité est obtenu par analyse de cime et un suivi de croissance sur un développement fixe. Ce sont, la probabilité de développement des tiges (P ou $b1$), la probabilité de développement des branches (B ou $b2$), la probabilité de ramification des axes (A), le rapport de rythme de développement des tiges par rapport aux branches (W), le rang d'apparition des premiers rameaux sur la tige principale (Na), le phyllochrone (temps de fabrication d'un phytomère par le méristème en jours), le temps de fonctionnement des feuilles (Tf) et le temps d'expansion des feuilles (Te).

- les paramètres P et B sont des émissions aléatoire (stochastique) de phytomères et d'UC le long des axes ; ils décrivent un processus de Bernoulli et sont calculés selon la loi binomiale (Figure 16).

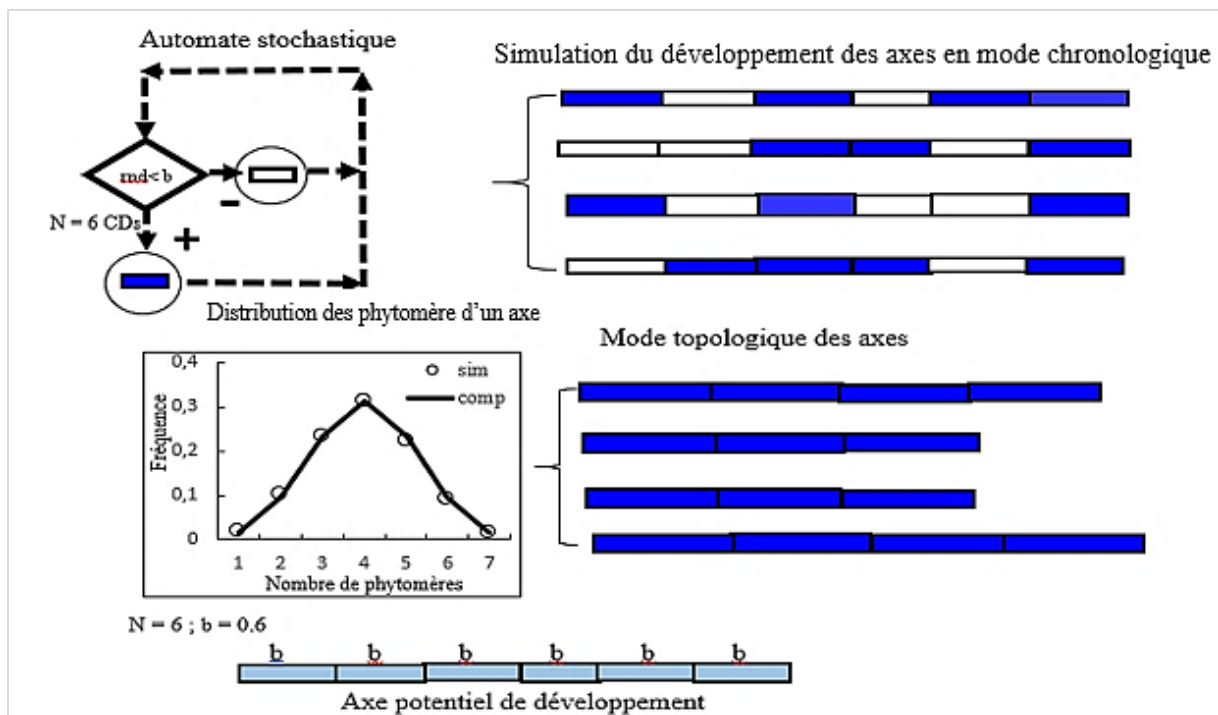


Figure 16 : illustration de la méthode de Monte Carlo du processus de Bernoulli et de la loi binomiale à six cycles de développements.

La probabilité de production de phytomère (b) est une valeur constante et fixée par la plante, tandis que le fonctionnement du méristème (repos ou fonction) à chaque cycle de développement est aléatoire (rnd) dépendant des conditions du milieu. Dans le cas présent on a, $b = 0.6$, si $rnd = 0.8$; $rnd > b$ alors le test est négatif ce qui conduit à une pause du méristème qui est endormi ; si $rnd = 0.3$; $rnd < b$ alors le test est positif, le méristème produit un phytomère.

(Source : De Reffye *et al.*, 2018)

-le paramètre A qui est la ramification ou le nombre de branches mises en place, correspond à la production de phytomère et d'UC par les méristèmes latéraux. Le calcul est comme suite : à $K = 1$, $A(1) = 2 / 3 = 0,66$ (Deux individus sur trois présentent des branches), à $K = 2$, $A(2) = 0$ (aucun individu ne présente de branche), à $K = 3$, $A(3) = 1$ (les trois individus sont ramifiés) ; la probabilité moyenne A est donc : $A = (A(1) + A(2) + A(3)) / 3 = 0,55$.

-le paramètre W , c'est le rythme de fonctionnement d'un méristème et c'est un nombre w qui conditionne l'alternance entre les cycles d'activité et de repos des méristèmes. Par exemple, pour $w = 0,5$ (Figure 17), un axe poussera deux fois moins vite que l'axe référencé pour $w = 1$ qui donne le développement normal. Il correspond à la série indéfinie 101010. À chaque valeur numérique de w , on fait correspondre une suite périodique alternée de 1 et 0 qui positionne les cycles d'activité (qui, eux-mêmes, correspondent à la création des phytomères) et les cycles de repos des méristèmes qui correspondent aux pauses. Le rythme simulé correspond à la somme des cycles d'activité (1) par rapport au nombre total de cycles de développement. Il tend vers w avec l'accroissement du nombre de cycles. Un algorithme donne une solution pour la plus petite période possible qui caractérise w . Cette suite contient des pauses dites structurelles dont l'emplacement est fixé périodiquement le long de l'axe de développement. Il en résulte une production cumulée de phytomères en escalier qui représente une bonne approximation discrète du rythme. Plus la branche est longue, plus le rapport de rythme observé tend vers la valeur nominale w .

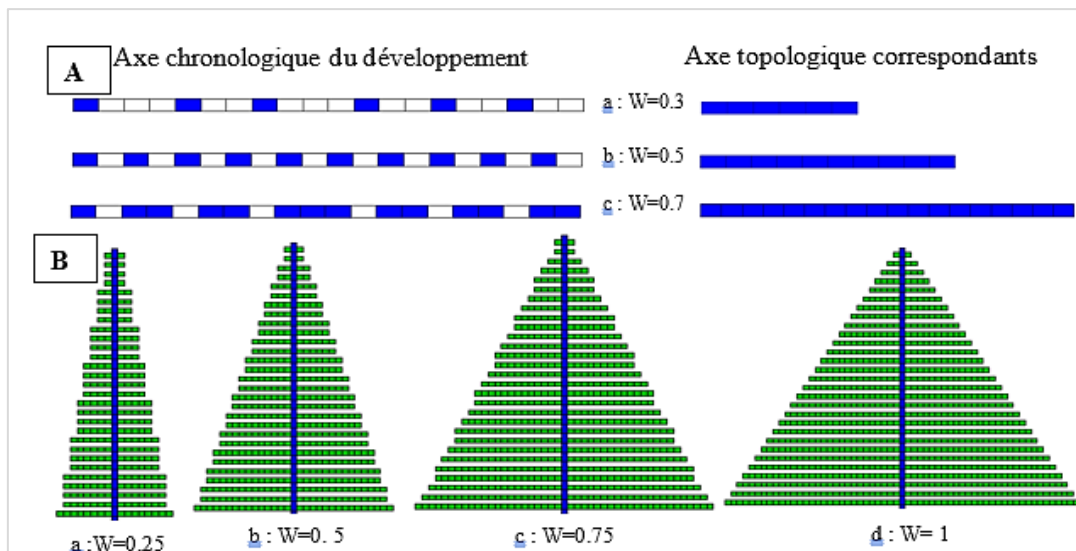


Figure 17 : structure d'emplacement périodique des phytomères et/ou UC le long d'un axe selon différents rythmes de développement

Rythme de développement (A) et l'effet du rapport de rythme (W) sur la cime des plantes (B)

(Source : De Reffye *et al.*, 2018)

-le paramètre N_a donne le rang du phytomère ou de l'UC à partir duquel la ramification (A) se stabilise, en partant de la base de la tige. Chez les arbres, la ramification se met en place progressivement jusqu'à un seuil donnant une intensité stationnaire ;

-les paramètres T_f (Temps de fonctionnement des feuilles) et T_e (Temps d'expansion des feuilles) sont les nombres étages ou rangs de phytomère ou UC des tiges (en cycle de développement) possédant des feuilles chlorophylliennes photosynthétiques.

La figure 18 donne la description schématique des paramètres de développement. Sur cette figure, la tige principale de couleur bleu a un développement indéfini. Les branches encore vivantes sont vertes, tandis que les branches mortes sont grises. Deux branches vivantes consécutives sont appelées couple de branche.

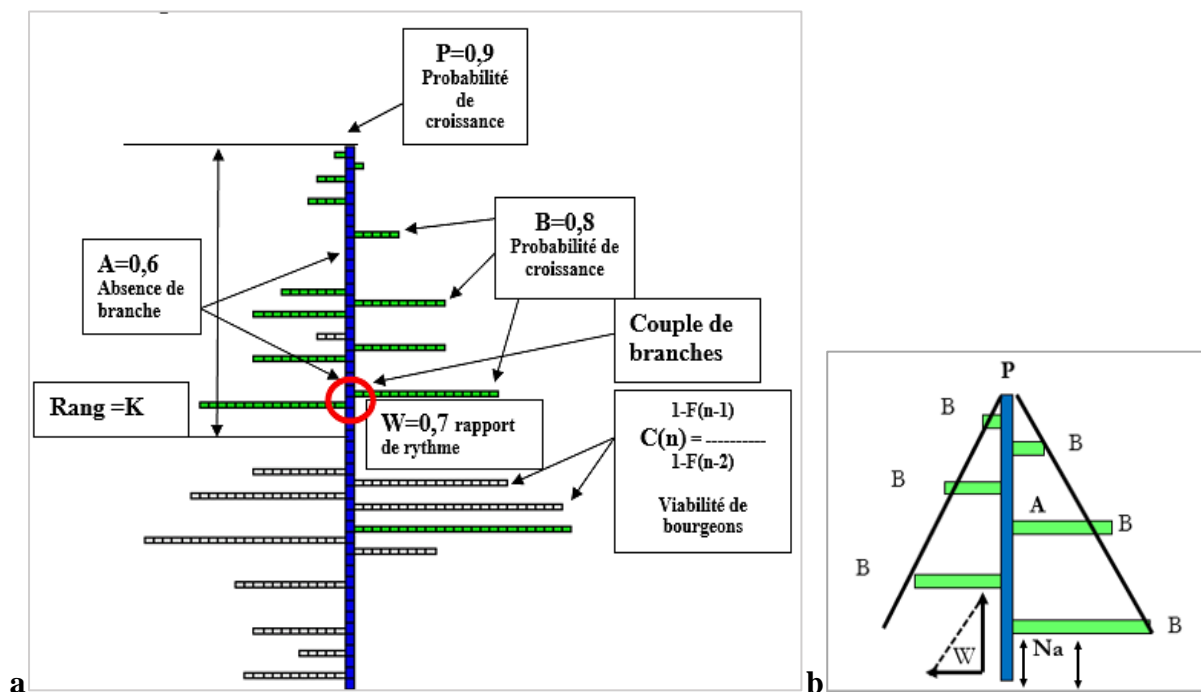


Figure 18 : description schématique des paramètres de développement topologique

a : description et **b** : le modèle

Notons que, la modélisation du développement des plantes est très importante, car elle permet d'explorer les liens entre l'environnement et la structure des plantes (Diao *et al.*, 2012). L'impact de la topologie sur le fonctionnement des plantes a été observé et exploré par des études de modélisations fonctionnelles et structurelles (Soualhou *et al.*, 2021 ; Tondjo *et al.*, 2018 ; Kang *et al.*, 2008). L'importance du développement topologique pour le fonctionnement des plantes ont été théoriquement analysé dans le modèle GreenLab (Letort *et al.*, 2009). Dans le modèle Greenab, le nombre de phytomères produits au cours de la vie de la plante peut être utilisé pour estimer la production totale de biomasse, ce qui permet d'allouer la biomasse aux

organes en fonction de la force du puits. L'interaction entre la structure aléatoire et le partitionnement de la biomasse a également été explorée dans le modèle GreenLab (Kang *et al.*, 2008 ; Wang *et al.*, 2011).

3.2.1.3. Paramètres de croissance

Les paramètres sont de deux types. On a les paramètres observables, calculés directement à l'aide des observations de terrain et les paramètres cachés qui sont impossible à mesurer sur le terrain, mais estimés par inversion du modèle.

Les paramètres observables décrivent la topologie de la plante à modéliser à un âge donné. Ces paramètres sont :

- $n_a = 1$ axillaire par nœud avec 2 âges physiologique à 2 ans pour nos trois espèces cibles ;
- les paramètres de l'automate de développement que sont, $N_f(t)$ qui est le nombre de feuilles produites au cycle t , $N_e(t)$ qui est le nombre d'entrenœuds produits au cycle t , $N_c(t)$ qui est le nombre d'éléments de cernes au cycle t (A chaque élément de cerne est associé une feuille. Dans GreenLab, les éléments de cernes sont des organes au même titre que les feuilles ou les entrenœuds, mais dont la durée d'expansion est fixée à un seul cycle de développement, leur puits ne dure qu'un seul cycle de développement. A chaque nouveau cycle de développement, une feuille active produit un nouvel élément de cerne qui apporte sa part individuelle à la croissance radiale des axes) ;
- les paramètres d'allométries que sont, le poids spécifique de la feuille (masse sèche/surface ε), l'infradensité, considéré comme constante dans le modèle, l'allométrie des rapports longueur-volume des entrenœuds et l'allométrie entre puits des organes (les organes de même nature sont supposés avoir la même fonction variation de puits quel que soit leur catégorie d'axes. Par contre, la force du puits change. Le rapport entre les poids secs des organes des différentes catégories est donc proportionnel au rapport des puits et est calculé en utilisant des allométries. La référence est le puit de l'organe d'âge physiologique 1 (le tronc), le puits de l'organe (Po) d'âge physiologique p est donc $Po(p) = kp * Po(1)$ (12). Cela signifie que le puit d'un entrenœud d'âge physiologique p , par exemple, est kp fois inférieur sur l'axe d'âge physiologique p que sur le tronc. L'allométrie (kp) peut se mesurer directement en pesant les organes ou s'estimer par la méthode des moindres carrés) ;
- les paramètres de durée de développement des organes que sont, le temps de fonctionnement des feuilles t_a et le temps d'expansion des organes t_x ;

- le coefficient d'extinction de la lumière k , intervenant dans la loi de Beer ;
- la production topologique en organes de la plante : le nombre total de chaque type d'organe.

Les paramètres cachés sont les sorties du modèle et sont calculés par méthode inverse.

Ce sont :

- les paramètres sources que sont, la biomasse initiale qui correspond au poids de la graine (Q_0), la hauteur d'eau transpirée par la plante par jour sous l'effet de climat (E), la résistance à la transpiration des feuilles (R), l'efficacité climatique (I/R), la surface de production de la plante ou surface efficace de production du feuillage (Sp) ;
- les paramètres force de puits des organes ou coût de construction de l'organe (P_0) que sont, la force de puits de la feuille (P_l), la force de puits de l'entre-nœud (P_e) et la force de puits du cerne (P_c), « Cette biomasse est prélevée dans le pool commun. La force de puit d'un organe varie selon son type, son âge physiologique et son âge chronologique ; elle croît depuis la création de l'organe jusqu'à un maximum, puis décroît et enfin s'annule lorsque l'organe a atteint sa maturité » ;
- les paramètres B_{01} et B_{02} des fonctions « beta » de variations de la force de puits que sont, le premier coefficient de fonction « beta » des organes (B_{01}) et le deuxième coefficient de fonction « beta » (B_{02}) ;
- le paramètre λ de la loi de *Pressler* ou coefficient de diffusion des assimilés pour la croissance secondaire (cerne de bois et moelle) ; Si $\lambda = 1$ c'est entièrement la loi de *Pressler* mais, si $\lambda < 1$, c'est en partie liée au pool commun ;
- la quantité totale de biomasse produite (Qt) par la plante.

3.2.1.4. Equations de la dynamique de croissance et de la demande totale de la plante

Le calcul de la production de biomasse se fait d'une façon récurrente. La reconstruction de la plante à l'aide d'une structure topologique n'est pas nécessaire. La production $Q(t)$ de la plante au cycle t dépend des productions des cycles précédents dont le résultat du fonctionnement est inscrit dans l'architecture. Elle fait le paramètre E (Efficacité climatique), la résistance à la transpiration R , la surface de la production (Sp) correspondante à un *LAI* (Leaf Area Index) individuel de la plante, le nombre de feuilles fonctionnelles présentes à l'âge chronologique t (De Reffye, 2009). Ce nombre dépend du modèle architectural et peut-être estimé par l'automate botanique du modèle, la demande en assimilés des organes « o » à

l'instant i et la demande de tous les organes sur la période d'intégration (De Reffye, 2009). Ce qui donne : $Q = C \cdot PAR(t) \cdot (1 - \exp(-k \cdot LAI(t))) \cdot \Delta t$ (13) ;

$$Q = C \cdot PAR \cdot Sc \cdot \left(1 - \exp\left(-k \cdot \frac{Sf}{Sc}\right)\right) \cdot \Delta t \quad (14) \quad ; \quad Q(t) = C \cdot E(t) \cdot Sp(t) \cdot \left(1 - \exp\left(-k \cdot \frac{Sf(t)}{Sp(t)}\right)\right)$$

$$(15) ; \quad \text{et} \quad \text{si} \quad Sp(t) \cdot \left(1 - \exp\left(-k \cdot \frac{Sf(t)}{Sp(t)}\right)\right) \quad (16) \quad \text{et} \quad \text{que}$$

$$Sf(t) = \frac{I}{\varepsilon} \cdot \sum_{\varphi=1}^{mx\varphi} \sum_{i=t-t_a+1}^{\max(t,t_a)} N_a^\varphi(i) \cdot q_a^\varphi(i,t) \quad (17) ; \quad \text{alors} \quad \text{on} \quad \text{a} :$$

$$Q(t) = \frac{E \cdot Sp}{r} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{k}{\varepsilon \cdot Sp} \cdot \sum_{i=t-t_a+1}^{\max(t,t_a)} \sum_{\varphi=1}^{mx\varphi} N_a^\varphi(i) \cdot \sum_{j=i}^t \frac{p_a^\varphi(j-i+1) \cdot Q(j-1)}{D(j)}\right)\right) \quad (18) ;$$

avec t : Age chronologique de la plante en cycle de développement, $Q(t)$: Quantité totale de biomasse au cycle t de développement, Sp : Surface de projection des feuilles, $E(t)$: Paramètre de l'environnement au cycle t de développement, égal à 1, R : résistance des feuilles à la transpiration, k : Coefficient de Beer Lambert pour l'interception de la lumière, ε : Epaisseur moyenne d'une feuille (**LMA**), φ : Age physiologique, $mx \varphi$: Age physiologique maximal, Na : Nombre d'organes dans la cohorte, ta : Temps de fonctionnement des feuilles, Pa : Puits des feuilles, $Q(t-1)$: Quantité de biomasse au cycle $t-1$, $D(t)$: Demande en biomasse de la plante au cycle t .

(De Reffye *et al.*, 2018).

Cette équation indique que la production totale de biomasse dépend des paramètres environnementaux (lumière, eau, température) qui gouvernent la photosynthèse. La quantité (Qt) représente la réserve totale en biomasse c'est à dire le pool commun. A chaque cycle, chaque organe puise de la biomasse dans le pool commun en fonction de son puits ; ce qui met tous les organes en compétition. Notons que la production de la biomasse ne dépend pas de l'architecture de la plante, toute modification architecturale ne devraient pas influencer de façon significative la réserve totale en biomasse chez une espèce donnée.

Pour un cycle t donné, la demande $D(t)$ de la plante correspond à la somme des puits en croissance. Il s'agit donc de multiplier les nombres d'organes dans les cohortes définies selon leur type, leur âge physiologique et chronologique, par la valeur de leurs forces de puits et de les sommer. Une cohorte d'organes est l'ensemble d'organes de même type et de même âge physiologique apparaissant au même moment. On suppose que l'équation de récurrence est validée jusqu'au cycle $t-1$. Les nombres de feuilles et d'entre-nœuds produits dans le cycle t par

l'automate botanique du modèle architectural sont respectivement $N_a(t)$ et $N_e(t)$. L'âge chronologique des organes peut potentiellement aller jusqu'à t cycles pour les organes apparus au premier cycle. La somme des puits de cohorte doit donc être comprise entre 1 et t . L'équation

$$\text{de la demande de la plante est : } D(t) = \left(\sum_{i=1}^t \left(N_a(t-i+1).P_a(i) + N_e(t-i+1).P_e(i) \right) \right) \quad (19)$$

Les termes de cette somme correspondent à la demande des organes d'âge i en CD (fonctions puits $P_o(i)$), qui sont en nombre $No(t-i+1)$ puisqu'ils sont apparus au cycle $t-i+1$.

Cette expression est la conséquence directe de la notion de pool commun et s'obtient par une convolution rapide à calculer car elle ne dépend que de l'âge de la plante et pas du nombre d'organes. La biomasse disponible pour un cycle de croissance est notée $Q(t)$; Les réserves de la graine (Q_0) permet de faire pousser les organes du premier cycle de développement. La matière disponible est utilisée par les organes pour leur expansion selon des règles d'allométries particulières au type d'organe. Le rapport poids sec/surface est supposé constant pour les feuilles. Le principe général du fonctionnement du modèle est présenté par la figure 19 et se décrit comme suite :

- les réserves de la graine permettent de fabriquer une certaine quantité de biomasse sèche $Q(t)$ au cycle t ;
- la répartition de la biomasse fabriquée dans différentes parties de la plante est en fonction de la compétitivité des organes ; cette répartition dépend de la force de puits (P) et de la modalité d'expansion des organes ;
- la géométrie des organes est obtenue à partir du volume frais en utilisant des règles allométriques, le volume frais est déterminé à partir de la biomasse sèche q et de l'infradensité d grâce à la relation $v=q/d$ (20) ;
- le poids spécifique des feuilles est supposé constant et la surface foliaire totale est supposée être impliquée dans la photosynthèse ;
- la biomasse sèche calculée au cycle t est réinjectée dans le modèle pour le cycle $t+1$. Le processus est lancé et la plante peut ainsi croître d'un cycle au suivant par récurrence.

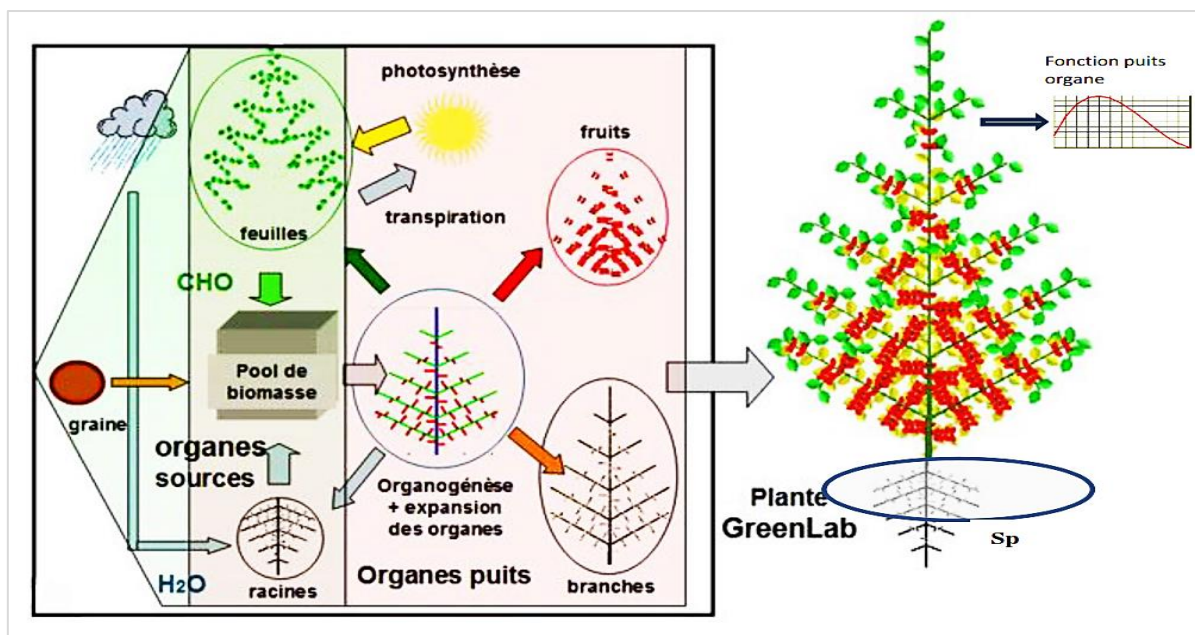


Figure 19 : schématisation de l'organigramme du fonctionnement du modèle GreenLab
(Source : De Reffye *et al.*, 2018).

3.2.1.5. Relations entre les dimensions des organes et la quantité de matière végétale

Si la quantité de matière sèche fabriquée au cycle $Q(t-1)$ est connue, il est possible de calculer les dimensions des organes élaborées au cycle t à partir des réserves du cycle précédent. Chaque organe fournit ou reçoit de la matière selon sa force de puits et du rapport de l'offre sur la demande qui est une variable globale dépendant du temps. Les organes de la plante peuvent être sources ou puits.

3.2.1.5.1. Organes sources

Ils produisent de la biomasse par photosynthèse en interceptant la lumière à leur surface. Ces organes sont également des puits car ils sont constitués de matière végétale. La feuille est le principal organe source. D'autres organes peuvent participer aussi à la photosynthèse, comme les tiges, les gaines des feuilles des graminées ou les gousses des légumineuses et les siliques des crucifères. A l'origine de la croissance, la graine est l'organe source initial.

3.2.1.5.2. Organe puit et forme des fonctions puits

Tous les organes sont des puits car ils utilisent la biomasse pour leur construction. La force du puits d'un organe varie selon son type et son âge chronologique. En général, le puits croît depuis l'émission de l'organe jusqu'à un maximum, pour ensuite décroître et enfin s'annuler quand l'organe a atteint sa maturité. D'autres puits sont particuliers, les cernes ligneux

des axes végétatifs résultants de la croissance secondaire pour les arbres et les racines. Dans le modèle GreenLab, ces dernières sont englobées dans un compartiment racinaire faute de pouvoir les détailler suffisamment. Un autre puit important et caché est le compartiment des réserves non structurales constituées essentiellement de grains d'amidon stockés dans les cellules.

Les organes peuvent se développer sur plusieurs cycles d'expansion. Le puits d'un organe de type o de $PA \varphi$ et de durée d'expansion T_o est modélisé, en fonction de son cycle d'expansion x par l'équation : $P_o^\varphi(x) = p_o^\varphi \cdot F_o\left(\frac{x}{T_o}\right)$ (21), où p_o^φ est la force de puits de l'organe ; x est son âge chronologique (AC) ; φ son âge physiologique (AP) ; o représente le type d'organe (a : feuille, i : entre-nœud, f : fruit). $F_o\left(\frac{x}{T_o}\right)$ est la fonction de variation du puits liée à sa durée d'expansion. Cette fonction est normalisée : $\max(F_o) = 1$.

Une fonction empirique est définie à l'avance, dont la forme est contrôlée par les paramètres à estimer et est suffisamment flexible pour s'adapter aux changements numériques des valeurs des puits lors de l'expansion de l'organe. Dans GreenLab, cette fonction est une loi bêta (Figure 20). Elle présente une grande plasticité et permet de bien prédire l'expansion de l'organe. Elle est définie par deux paramètres: a et b sur l'intervalle $[0, 1]$:

$$\beta(x) = \frac{(a+b-1)! \cdot x^{a-1} \cdot (1-x)^{b-1}}{(a-1)! \cdot (b-1)!} \quad 0 < x < 1 \quad (22).$$

Cette loi suit une moyenne (m) et une variance (v) dans $x \in [0, 1]$:

$$m = \frac{a}{a+b}, \quad v = \frac{a \cdot b}{(a+b)^2 \cdot (1+a+b)} \quad (23).$$

Les notations sont modifiées pour rendre la formulation de cette équation plus appropriée en la rendant discrète. On note T_o le domaine de x pour le AC de l'organe exprimé en cycles : ($T_o \geq 1$ et $0 \leq x \leq T_o$). Le coefficient C_o est calculé de manière à ce que le maximum de la fonction soit normalisé à 1.

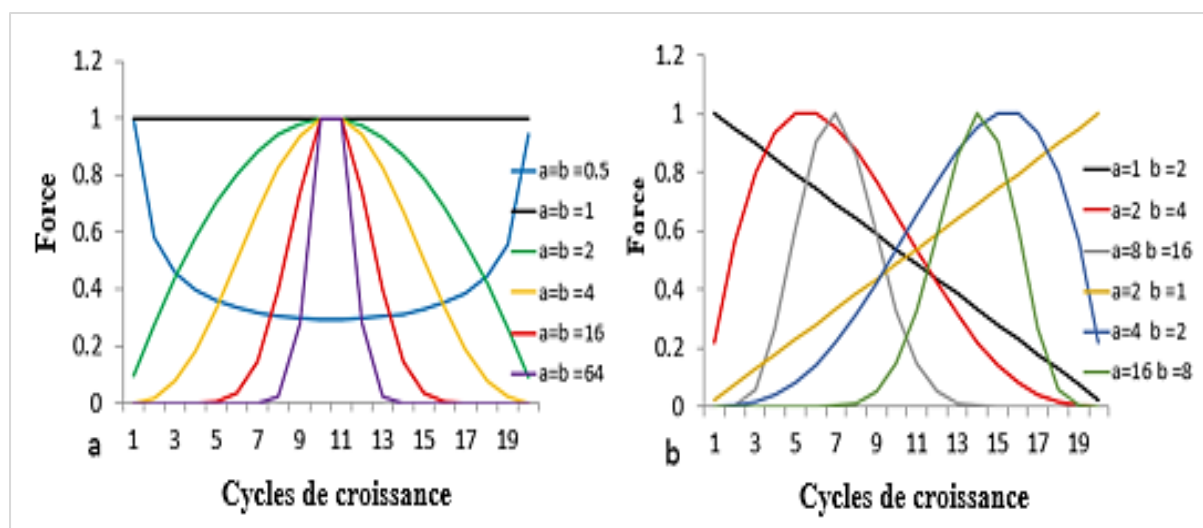


Figure 20 : formes des fonctions de descente de la loi bêta discrétisée et normalisées sur un intervalle T_0 de 20 cycles.

a : forme symétrique avec $a = b$. Les valeurs données pour a et b sont : 0,5, 1, 2, 4, 16 et 64. Pour $a < 1$, la fonction a une forme de U . Pour $a = 1$, la fonction est constante. Pour $a > 1$, la fonction a une forme de cloche symétrique centrée sur $m = 10$ ($m = 20a / (a + b)$). Plus a et b augmentent, moins la courbe s'étale. **b** : forme asymétrique. on choisit comme exemples les couples de paramètres a et b de la loi bêta : (1, 2), (2, 4) et (8, 16). Plus $a + b$ est grand, moins la courbe est étalée.

(Source : De Reffye *et al.*, 2018).

3.2.1.6. Simulation de l'architecture des plantes

La simulation des plantes et des peuplements végétaux est la représentation de leur architecture en trois dimensions (3D). Elle se réalise en ajoutant des opérateurs géométriques aux paramètres du fonctionnement des méristèmes identifiés. L'image obtenue donne les nombres et les différents types d'organes produits par la plante à un âge donné sur la base du « stochastique ». La simulation de l'architecture d'une plante offre une matérialisation incomparable du résultat du fonctionnement écophysologique. En effet, l'architecture observée d'un arbre est le résultat de processus aléatoires introduisant de la variabilité à l'échelle d'une population. Ces processus aléatoires sont modélisés à l'aide d'un automate botanique stochastique. La simulation numérique d'un arbre met en place des cohortes de phytomères créés par des méristèmes synchronisés dans leur fonctionnement et selon les règles de cet automate botanique. A chaque pas de temps, un nouveau phytomère peut ou non être émis à l'apex de l'axe. Le mode de représentation chronologique rend visible le fonctionnement par la matérialisation des pauses et des fonctionnements dans la structure produite. Par exemple, une pause correspond à un phytomère « virtuel » qui ne peut pas ramifier, mais qui peut donner par

filiation un phytomère « réel ». De même, un bourgeon axillaire prive la structure d'un axe s'il avorte. La structure simulée n'explore donc qu'une partie de la structure potentiellement réalisable (structure qui serait générée si tous les méristèmes avaient fonctionné correctement). La structure « potentielle » correspond à la structure qui matérialise toutes les réalisations possibles des axes engendrés par les méristèmes. Les éléments de cette structure théorique sont dénombrables. Une structure simulée à un moment donné est donc simplement une partie de la structure potentielle. Toutes les structures simulées possibles, qui peuvent être en très grand nombre, trouvent leur place dans la structure potentielle. La structure potentielle est construite par l'automate botanique qui donne à chaque phytomère potentiel sa probabilité d'occurrence qui dépend des lois de ramification fournies par les règles de développement de l'espèce étudiée (Zhao *et al.*, 2001).

3.2.1.7. Séries organiques

Une série organique (Buis & Barthou, 1983) est décrite par des mesures de biomasse sèche ou de dimensions effectuées pour chaque type d'organes (feuille, entrenœuds, fruit). Ces mesures sont ordonnées selon le rang des organes à partir du sommet ou de la base de l'axe. Sur les plantes à croissance rythmique, les séries ordonnées à partir de la base des UC ont un développement synchrone. La série organique peut être simple ou composée. Elle est simple si elle provient de la mesure d'un seul organe, et composée si elle est déterminée à partir des données moyennes mesurées sur plusieurs organes. L'ensemble des séries organiques constitue une cible à laquelle il faut faire correspondre une sortie homologue du modèle. Dans un premier temps la simulation du développement permet de connaître la demande de la plante à tous les âges chronologiques. Dans un deuxième temps, les paramètres sources et puits sont optimisés de façon à ce que la biomasse ajuste au mieux les séries organiques calculées et mesurées. Les séries organiques contiennent donc toute l'information nécessaire pour estimer les paramètres.

Le modèle GreenLab permet donc de calculer les paramètres source de biomasse et les paramètres force de puits des organes en vue d'accéder à une meilleure compréhension de développement global des plantes et de caractériser leurs variabilités. L'obtention des puits des organes est d'un grand intérêt capital pour l'amélioration de la croissance et l'optimisation des systèmes de culture de nos espèces cibles, puisque la force de puits est le principal moteur de la répartition de la biomasse dans la plante et le seul paramètre qui peut définir au mieux le volume des organes.

DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES

Chapitre 4 : Site d'étude

Nos travaux se sont déroulés dans deux types d'environnements (pépinière et forêt) selon la nature de l'expérimentation (recherche de semence de qualité et modélisation d'une part et architecture d'autre part) en Côte d'Ivoire. Les études liées à la recherche de semence de qualité ainsi que les études de modélisation ont été effectuées en pépinière et champs, dans deux localités distinctes de par leurs caractéristiques pédoclimatiques. Ces deux localités sont Daloa (zone humide), située dans le Centre-Ouest et Korhogo (zone sèche), située dans le Nord. A Daloa, l'expérimentation a été conduite à l'Université Jean Lorougnon Guédé (Figure 21). Tandis qu'à Korhogo, elle a été conduite au CNRA (Centre National de Recherche Agronomique) à la station expérimentale forestière « DeFo-Diabaté Kamonon-Lataha » (Figure 22). Les études sur l'architecture des espèces cibles se sont déroulées en forêt, dans six (6) localités (Toumodi, Bouaké, Katiola, Niakara, Korhogo et Ferké) suivant un gradient bioclimatique (Figure 23). Les figures 21, 22 et 23 présentent les situations géographiques des localités prospectées. Les différentes caractéristiques pédoclimatiques des sites d'études sont consignées dans le tableau 1.

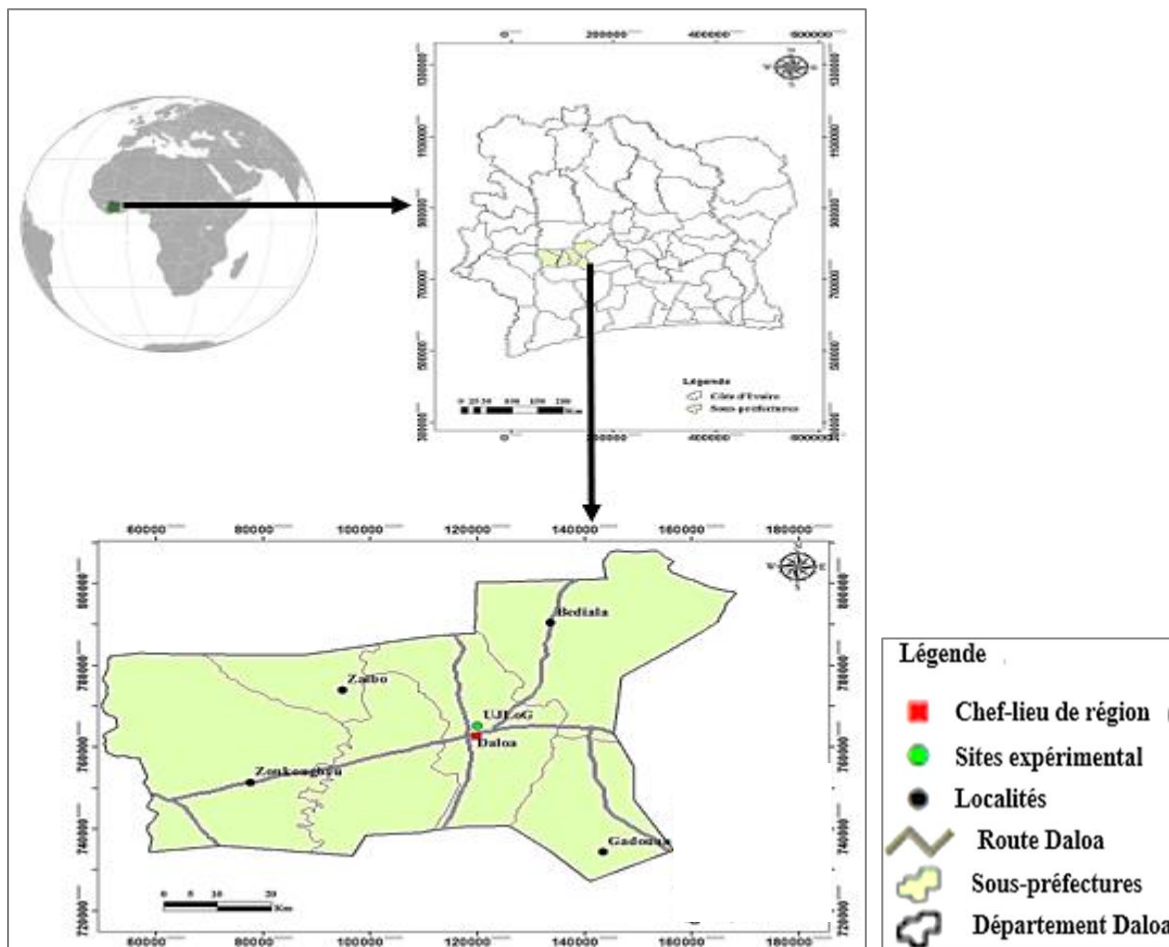


Figure 21 : localisation de l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa.

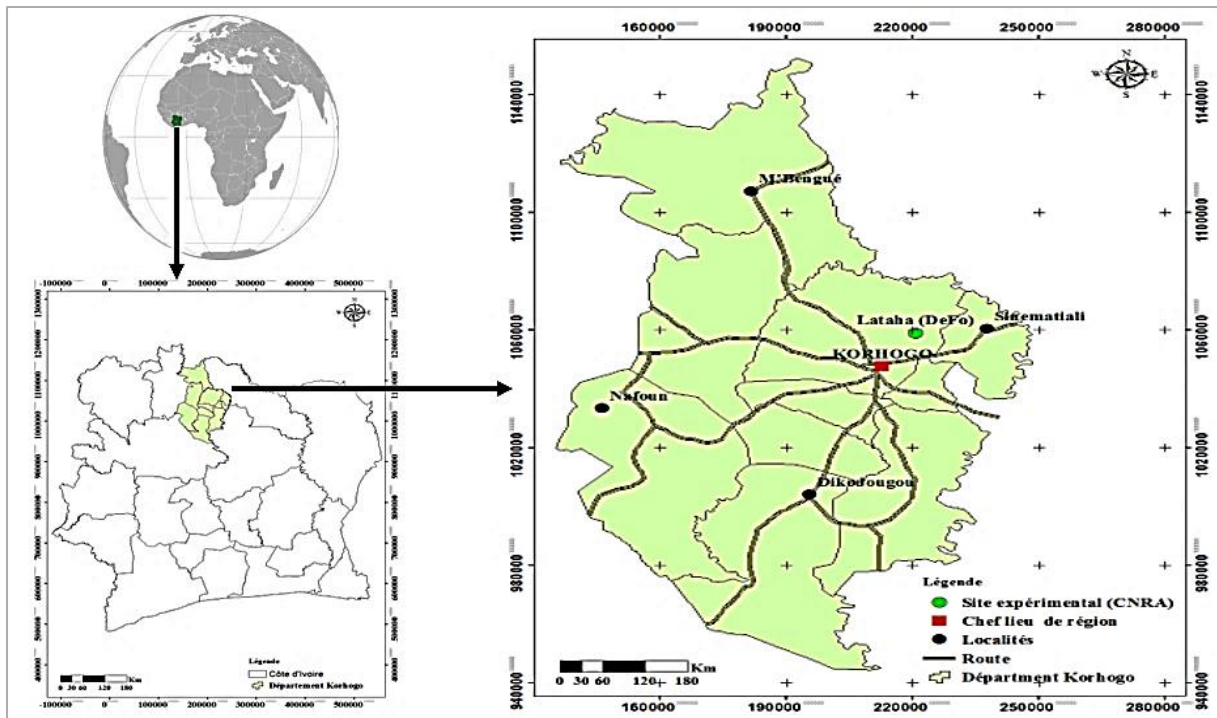


Figure 22 : localisation de la station expérimentale forestière DEFO « Diabaté Kamonon » de Sédiakaha dans le département de Korhogo.

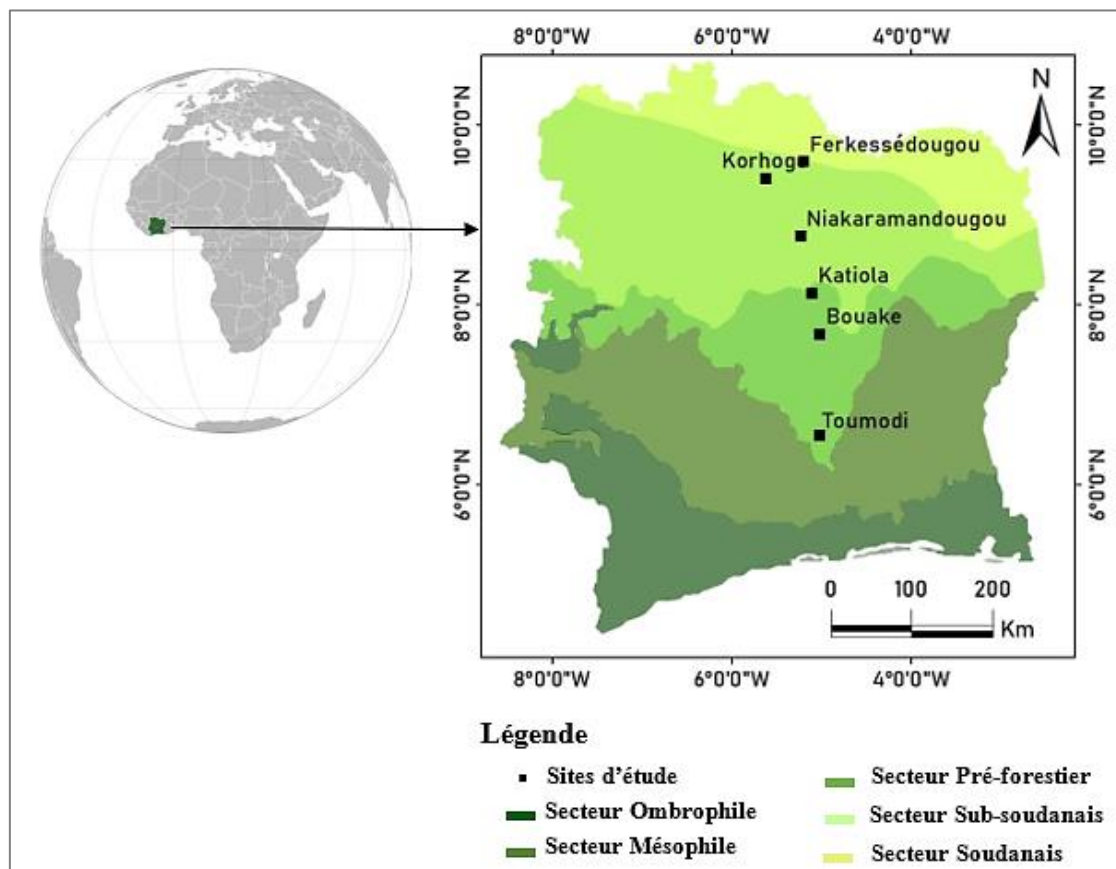


Figure 23 : situation géographique des sites d'étude architecturale.

Tableau 1 : caractéristiques pédoclimatiques des sites expérimentaux

Sites/localités	Coordonnées GPS	Végétation	Climat	Température (°C)	Pluviométrie (mm/an)	Type de sol
Ferké	5°23'43,39644 " W ; 9°36'1,87056" N	Savane boisée et arbustive	Tropical sec	27 - 40	263-1200	Sols Ferrallitiques (ferrisols, Cambisols, Fluvisols, Luvisols), fortement à moyennement désaturés.
Korhogo	5°36'12,39612 "W ; 9°33'24,68988 " N	Forêt claire (savane boisée)	Tropical sec	26,6 - 35,7	817 - 1216	Ferrugineux (90%) et Ferrallitique (10%) : sol superficiel graveleux, gravier profond à texture lourde, pauvre en matière organique, fortement désaturé.
Niakara	5°18'40,73544 "W ; 8°40'47,97912 " N	Savane arborée et herbeuse	Tropical sec	24,7 - 38	800-1230	Complexe de sols ferrallitiques faiblement désaturés et des sols bruns eutrophes tropicaux dérivés de roches basiques
Katiola	5°7'35,814"W ; 8°13'53,94" N	Savane arborée et herbeuse	Tropical humide	24 - 36	1100-1200	Sols ferrallitiques moyennement et fortement désaturés
Bouaké	5°5'47,3289"W ; 7°40'45,335" N	Forêt claire (savane arborée)	Tropical humide	23,6 - 34	1100-1200	Ferrallitique gravillonnaire, moyennement saturé, remanié, peu profond issu d'un matériau d'altération granitique avec une texture sablo-argileuse.
Toumodi	5°1'34,95576" W ; 6°22'42,67848 " N	Forêt claire (savane arborée, herbeuse et forêts galeries)	Tropical humide	26,6 - 30	1092-1200	Sol ferrallitique sur roche-mère granitique (sol sablo-argileux), caractérisée par la faible différenciation et par la consistance friable de leurs horizons.
Daloa	6°26'9,19788" W ; 6°54'32,058" N	Forêt dense tropicale humide	Tropical humide	21 - 34	1000 -1900	Ferrallitique, profond, acide et désaturé en bases échangeables, riche en matière organique.

°C= degré Celsius, mm= millimètre, W= ouest, N= nord.

(Source : Anonyme, 2020)

Chapitre 5 : Matériel

5.1. Matériel végétal

Le matériel végétal est constitué de graines, de plantules, de plants et de plantes sauvages de *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* et *Parkia biglobosa*.

Ainsi, par espèce :

- 1080 graines issues de différentes tailles moyennes de catégories de graines (grosses, moyennes et petites) ont servi à l'étude de la germination ;
- 360 plantules issues de la germination des trois catégories de taille de graine, âgées de quatre mois ont été utilisées pour évaluer la croissance des plantules ;
- 180 plants issus de la germination des graines, âgés de 6, 12 et 24 mois ont servi pour l'étude de la modélisation ;
- et enfin, 360 arbres jeunes, adultes et vieux issus de régénération naturelle ont été utilisés pour l'étude architecturale.

5.2. Matériel technique

Le matériel technique utilisé dans cette étude est composé de :

- GPS Garmin Etrex 10 pour la localisation des semenciers et des individus échantillonnés pour l'étude architecturale, puis pour le guidage, le repérage et l'orientation en forêt ;
- Jumelles Nikon Prostaff 7s 10X42 pour les identifications des espèces cibles à distance en forêt puis la description architecturale et la schématisation d'individus de grandes hauteurs ;
- Appareil photo numérique Nikon Coolpix 4500 de 45 méga pixel pour les prises de vues ;
- Dendromètre Blume Leiss-BL-7 et ruban mètre pour les mesures de hauteur et de circonférence (DBH) des individus d'arbres échantillonnés ;
- Règle graduée et pied à coulisse numérique eSynic-ULTRATOOL 0-150mm pour les mensurations des organes des plantes évaluées ;
- Balance électronique OHAUS de précision 0,001 g et étuve pour l'évaluation de la biomasse ;
- Bac plastique de dimension 60 x 30 x 15 cm pour le stockage des semences et des organes ;
- Sachet polyéthylène de dimension 20 x 10 cm pour le stockage de terreau en pépinière.

Chapitre 6 : Méthodes

6.1. Germination et croissance des plantules

L'ensemble des expérimentations se sont déroulées de décembre 2018 à juillet 2019.

6.1.1. Récolte et catégorisation des graines

Pour chacune des trois espèces cibles, des graines ont été collectées concomitamment sur des arbres mère, dans quatre (4) localités : Katiola, Niakara, Korhogo et Ferké. Les graines échantillonnées dans chaque localité ont été toutes mélangées dans un bac (récipient ou cuvette). Un lot aléatoire et répétitif de 100 graines est tiré au sort du bac pour des mesures de dimensions. Pour chaque graine, la masse a été pesée, ensuite la longueur, la largeur et l'épaisseur de chaque graine ont été mesurés.

Ainsi, chez *Khaya senegalensis*, environ 29 lots de 100 graines ont été obtenus et mesurés (427 à Katiola + 793 à Niakara + 804 à Korhogo + 856 à Ferké = 2880 graines). Chez *Pterocarpus erinaceus*, 13,46 lots de 100 graines ont été obtenus et mesurés (124 à Katiola + 529 à Niakara + 611 à Korhogo + 82 à Ferké = 1346 graines) et enfin un total d'environ 30,48 lots de 100 graines ont été obtenus et mesurés pour l'espèce *Parkia biglobosa* (434 à Katiola + 1026 à Niakara + 1009 à Korhogo + 579 à Ferké = 3048 graines).

Ensuite, pour chaque espèce les graines mélangées dans des bacs ont été triées et réparties arbitrairement en trois catégories en fonction de la taille : grande, moyenne et petite, selon leurs caractéristiques morphométriques et leurs poids.

6.1.2. Mise en place des essais et ensemencement

Des sachets noirs en polyéthylène de 20 x 10 cm de dimensions, ont été remplis de terreau local et disposés en pépinière. Ces sachets ont été groupés en trois blocs représentatifs des trois espèces cibles. Chaque bloc contenant une seule espèce, est constitué de trois (3) sous-blocs (figure 24, Annexe 2). Chaque sous-bloc contenant 90 sachets, est représentatif de chacune des trois (3) catégories de graine (grosses, moyennes et petites). Ensuite, 180 graines par catégorie ont été sélectionnées au hasard, trempées dans l'eau, puis semées immédiatement à une profondeur de 2 cm, à raison de deux (2) graines par sachet. Ceci donne : 2 graines x 90 sachets x 3 catégories de graines = 540 graines (180 grosses graines + 180 moyennes graines + 180 petites graines) par espèce (figure 24). Le même procédé a été répété sur les deux sites d'étude (Daloa et Korhogo) pour chaque espèce. Les graines ont été traitées avec de l'insecticide

(FURADAN) granulé pour lutter contre les rongeurs. L'entretien dans les pépinières a consisté en un arrosage quotidien et un désherbage manuel (Annexe 2).

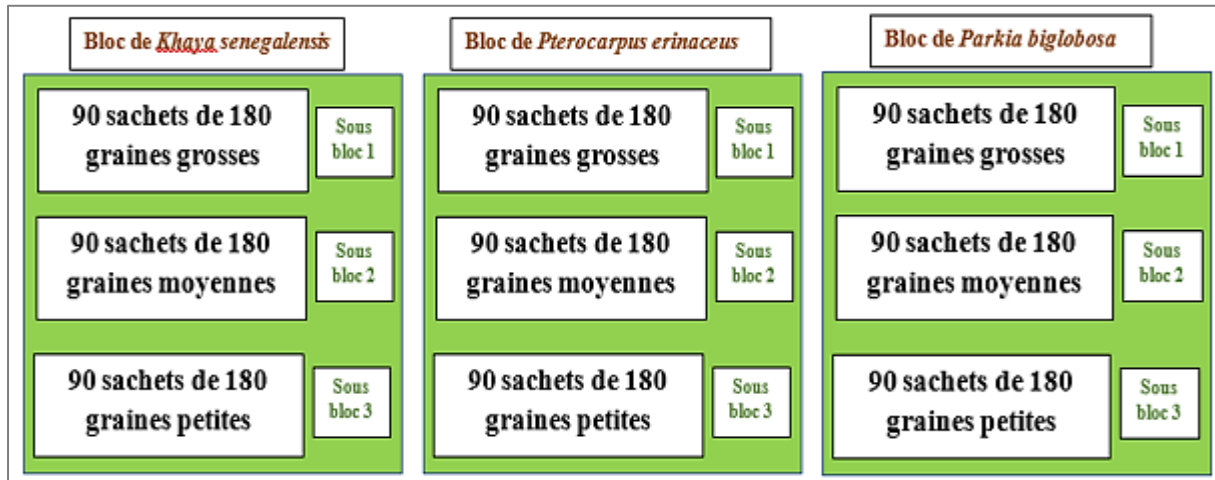


Figure 24 : représentation schématique de la mise en place des blocs d'essais de germination en pépinière pour chaque site expérimental.

6.1.3. Paramètres de germination évalués

Les données ont été collectées à travers une fiche (Annexe 1) et les paramètres évalués ont porté sur :

- le temps d'attente ou de latence, c'est le temps en jour nécessaire pour que la première graine germe dans un ensemble de lot (nombre de jour nécessaire à la première germination) ;
- le délai de germination, c'est le temps en jour entre le semis et la germination de chaque graine dans un ensemble de lot (nombre de jour nécessaire à la germination de chaque graine semée) ;
- le temps de demi (1/2) germination, c'est le temps moyen en jour qui s'écoule jusqu'à ce que 50% des graines germent dans un ensemble de lot ;
- la durée ou étalement de la germination, c'est le temps en jours entre la première et la dernière germination d'un ensemble de lot ;
- le taux de germination, c'est la proportion de graines germées par rapport au nombre total de graines semées. Il est exprimé en pourcentage ;
- la dynamique ou vitesse de germination, c'est le nombre cumulé de graine ayant germé quotidiennement durant tout l'étalement de la germination d'un ensemble de lot.

6.1.4. Etude de la croissance des plantules

Après l'émergence des plantules, les préfeuilles ont été traitées avec du DECIS (principe actif) pour limiter les attaques d'insectes et de larves. La croissance des plantules a été suivie pendant 2 ans, en raison d'une visite (mensuration) chaque deux jours.

Un total de 60 plantules âgées de quatre mois, issues de la germination de chaque provenance de catégorie de graines ont été sélectionnées au hasard dans l'ensemble de la population de chaque espèce. Ce schéma a été répété sur le site expérimental de Daloa et Korhogo. Ceci donne pour chaque espèce et par site d'étude, 60 plantules issues des grosses graines, 60 plantules issues de moyennes graines et 60 plantules issues des graines de petites tailles.

La croissance a été évaluée à l'aide d'une fiche (Annexe 1) de paramètres de vigueur des jeunes plants (la hauteur totale des plants, le diamètre au collet des plants, nombre de feuilles simple et composée, la longueur et le diamètre médian des racines) et de Biomasse sèche des jeunes plants (la masse sèche totale des jeunes plants ; la masse sèche totale des feuilles ; la masse sèche de la tige ; la masse sèche des racines. Les organes feuilles, tiges et racines ont été séchés à l'étuve à 60 °C pendant 72 heures puis pesés afin d'obtenir la biomasse sèche des jeunes plants (norme universelle et standard). Avant les pesées, les organes ont été conservés dans du gel de silice.

Les paramètres de vigueur ci-dessus ont été mesurés à l'aide d'une règle graduée en centimètre et d'un pied à coulisse électronique en millimètre. Les biomasses sèches ont été mesurées à l'aide d'une balance de précision 0,001 g.

6.2. Etude architecturale des espèces cibles

Cette étude a été scindée en deux parties. Une partie traitant la variation des marqueurs primaires de croissance (marqueurs architecturaux) et une autre partie sur l'unité (diagramme) et les caractéristiques architecturales (Annexe 3). L'étude s'est déroulée de septembre 2019 à février 2021.

6.2.1. Marqueurs architecturaux

Au moyen d'analyse rétrospective, les marqueurs primaires de croissance des axes ont été identifiés et observés dans la couronne de chaque individu. Ces marqueurs résultant du

fonctionnement des méristèmes et qui subsistent pendant plusieurs années, permettent de reconstituer l'histoire du développement des plantes. Ces marqueurs sont :

-les phytomères ou métamères : c'est l'ensemble formé par entrenœud, feuille et bourgeon axillaire (Figure 25a) ;

-les cataphylles : ce sont des ébauches foliaires ou cicatrices laissées par les écailles d'un bourgeon débouffé (Figure 25b) ;

-les arrêts de croissance : c'est un grand nombre de cicatrices de paires d'écailles « 7 à 16 » foliaires laissées par le bourgeon terminal, du fait d'un stress abiotique (Figure 25c et d) ;

-les unités ou modules de croissance ou unités d'allongement, correspondant à un ensemble de phytomères initiés par le méristème apical durant une phase d'organogénèse et d'allongement ininterrompue et délimitée par deux arrêts de croissance (Figure 25c).

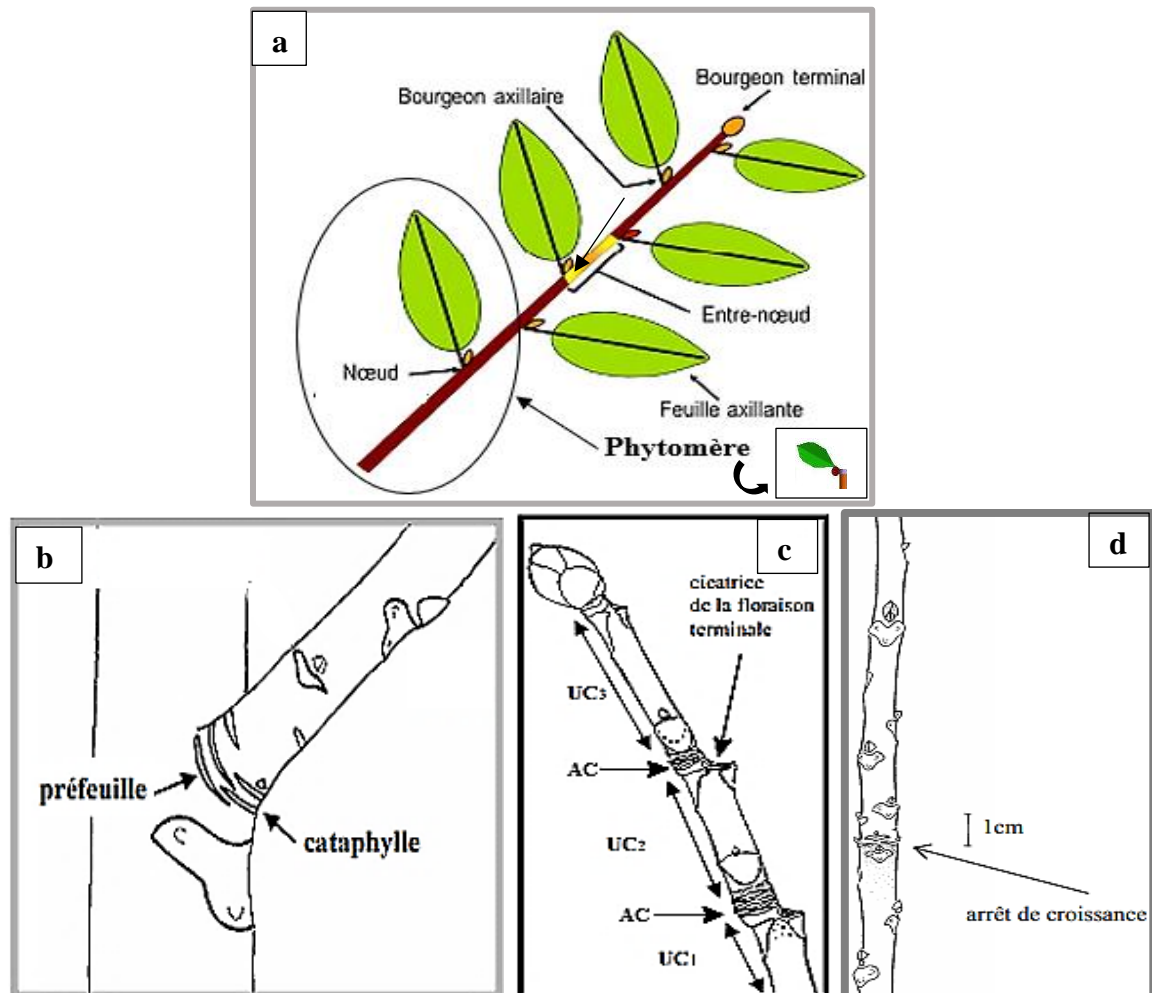


Figure 25 : dessins relatifs aux marqueurs architecturaux.

a : phytomère, b : cataphylles, c : unités de croissance (UC), c et d : arrêts de croissance (AC)

(Source : Sabatier, 1999)

Sur chaque axe échantillonné, nous avons observé et évalué le nombre d'arrêt de croissance, le nombre de phytomère porté par les quatre premières unités de croissance. La longueur et le diamètre moyen des quatre premières unités de croissance (UC), à partir de l'extrémité (sommets apical ou apex) de l'axe ont été également mesurés. Des axes collectés ont été fendus (coupes longitudinales et transversales) afin d'identifier les arrêts de croissance imperceptibles sur l'écorce des axes. En effet, dans certaines conditions environnementales, les AC étaient moins visibles sur les écorces (écorces lisses) le long des axes. Les données ont été collectées en saison pluvieuse et sèche à différents stades d'âges et selon deux habitats distincts (plein soleil et sous-bois).

La morphologie des marqueurs architecturaux traduit les difficultés de croissance des individus dans un milieu donné. En effet, un axe portant de nombreux d'arrêt de croissance avec des unités de croissance et/ou phytomères de plus en plus courts indique un développement défavorable (stress environnemental). En revanche, un axe avec des caractéristiques contraire indique un développement optimal et un environnement propice.

Ainsi pour identifier les milieux favorables à la culture des espèces cibles, nous avons calculé l'indice de développement favorable (*IDf*) (Caraglio & Sabatier, 2019 : communication personnelle). Il correspond à la moyenne des sommes de quotient de longueur d'unités de croissance (L_{UC}) par le nombre de phytomère quelle porte ($Nbr\sim Entrenœud$) à chaque rang d'UC (i), contenue dans les âges physiologiques (φ) des nombres de populations d'axes ($N_i^\varphi(p)$) échantillonnées pour chaque localité et habitat (P).

$$ID_f = M \cdot \sum_{n=1}^P \sum_{\varphi=1}^{m \times \varphi} N_i^\varphi(p) \cdot \left(L_{UC} \cdot \frac{1}{Nbr\sim Entrenœud} \right)_i \varphi p \quad (24).$$

Dans un ensemble de population d'individus à croissance rythmique, les individus ayant des *IDfs* plus élevés présentent un bon développement. Par conséquent, un milieu constitué d'individus à *IDf* plus élevé par rapport aux individus d'un autre milieu indique que ce milieu est plus favorable au développement. Ensuite, nous avons comparé les nombres d'arrêt de croissance (AC) de chaque axe entre eux ; plus l'axe contient moins d'AC, plus l'individu présente un bon développement.

6.2.1.1. Echantillonnage des arbres

Les arbres choisis étaient tous de régénérations naturelles et en bon état (indemnes de traumatismes). Ils ont été classés selon trois âges de développement (jeunes, adultes et vieux).

Les âges ont été déterminés sur la base de la taille dendrométrique (hauteur et diamètre) des arbres et par enquêtes (questionnaire) auprès des populations rurales détenant (propriétaires) des parcelles prospectées.

Pour chaque stade d'âge et par espèce, 10 individus ont été choisis arbitrairement par habitat (plein soleil et sous-bois), dans six localités (Ferké, Korhogo, Niakara, Katiola, Bouaké et Toumodi). Ce qui donne un total de 360 individus par espèce (10 individus x 3 âges x 2 habitats x 6 localités= 360 individus).

6.2.1.2. Choix du type d'axes et de l'habitat

Les types d'axes ont été choisis en fonction de l'accessibilité des couronnes dans deux habitats différents. Chez les jeunes arbres, les axes évalués concernaient le tronc. Quant aux arbres adultes et vieux, les évaluations ont porté sur les rameaux primaire, secondaire et tertiaires puis les rameaux courts. Les observations ont été réalisées sur place pour les jeunes arbres ; tandis que pour les arbres adultes et vieux, les axes ont été coupés et transportés en laboratoire pour les évaluations.

Deux types d'habitats (environnements) ont été considérés : le sous-bois et le plein soleil. Le premier concerne les individus vivant dans un environnement très ombragé avec un couvert forestier ou dans un environnement surpeuplé ou bénéficiant d'un abri supérieur. Le second concerne les individus isolés en plein soleil ou dans un environnement ouvert en contact direct avec la lumière du soleil.

6.2.2. Unités architecturales et caractéristiques

Basée sur les concepts et critères morphologiques (Barthélémy & Caraglio, 2007 ; Barthélémy, 1988), la morphologie globale, précise et complète du système ramifié aérien des individus a été décrite dans des milieux variés (sous-bois et plein soleil). Pour chaque espèce, des catégories d'axes de l'unité architecturale selon des propriétés morphologiques et fonctionnelles ont été identifiées. Les individus ont été caractérisés par un ensemble de critères architecturaux. L'agencement spatial et la structure des différents axes les constituant ont été intégré au moyen de dessins et de fiche d'analyse (Annexe 3).

La catégorisation des types d'axes des unités architecturales, ainsi que l'établissement des caractéristiques architecturales se sont effectuées à l'aide de traits qualitatifs suivants :

-l'axe feuillé (phyllotaxie et type de feuille) ;

- la stratégie de croissance (définie, indéfinie, monopodiale, sympodiale, polycyclisme) ;
- la direction et différenciation des axes (orthotrope, plagiotrope, mixte, agéotrope) ;
- le mode de ramification (ordre de ramification, immédiat, différée, retardé, rythmique, continu, diffuse, acrotone, mésotone, basitone, épitone, hypotone, amphitone) ;
- la taille des UC et pousses annuelles (en nombre d'organe phytomère et UC) ;
- la position de la sexualité (terminale, latérale) ;
- la caducité des feuilles (période à laquelle les feuilles tombent de l'arbre, phénologie) ;
- la conicité des axes (hauteur et diamètre) ;
- la complexité des axes (les ordres de ramification, relation porteur-porté).

A chaque catégorie d'âge (jeune, adulte et vieux), les caractéristiques morphologiques et architecturales fondamentales de chaque espèce arborescente cible ont été décrites sur pied à l'œil nu. Des jumelles ont été utilisées pour la description des plus grands arbres.

Au début, les individus plus jeunes (étape plantule non ramifiée) ont été observés et décrits jusqu'à des individus de plus en plus complexes et âgés (adultes et vieux). La plante entière a été prise en compte. Dans certains cas, des parties d'arbres après abattage ont été prélevées, pour faire des observations détaillées sur place et en laboratoire. Des notes précisant l'échelle, la localisation de la plante et certains faits ont été marqués sur chaque dessin. Chaque dessin a été une synthèse des observations réalisées sur plusieurs individus ayant atteint un même stade de développement.

6.3. Modélisation structurelle et fonctionnelle des espèces cibles

La modélisation structure-fonction (FSPM) avec le modèle GreenLab a été utilisée dans un premier temps pour calculer le fonctionnement et comprendre les processus stochastiques des espèces cibles. Dans un deuxième temps, elle a permis d'identifier et d'expliquer les relations source-puits des espèces cibles.

Quatre buts ont initié cette partie : 1) identifier et calculer les paramètres qui gouvernent le fonctionnement des méristèmes et le développement des espèces cibles ; 2) établir des équations allométriques de dimensions d'organes permettant la non destruction des espèces cibles ; 3) déterminer les paramètres source-puits, nécessaire à l'optimisation de la culture des espèces cibles et enfin 4) simuler l'architecture (imagerie de synthèse) des espèces cibles. Ces

4 principes sont étroitement liés. Les expérimentations se sont déroulées de août 2019 à décembre 2021.

6.3.1. Modélisation du fonctionnement méristématique et du développement

6.3.1.1. Schéma et calibration du modèle de fonctionnement et de développement

Jusqu'à 6 mois, les plants des espèces cibles ne ramifient pas, la plante est constituée d'un seul âge physiologique (tronc) et la dimension des axes est évaluée en nombre de phytomère. Cela donne un aspect synchrone au développement des plants. Les plants ramifient qu'à partir de la deuxième année et la plante à deux âges physiologiques à ce stade (tronc et branche). Compte tenu du volume et du nombre de phytomères dans l'architecture des individus à 12 et 24 mois, le changement de niveau d'observation est nécessaire. Il passe donc du niveau d'observation du phytomère au niveau de l'UC (dimension des axes évaluée en nombre d'UCs plutôt qu'en nombre de phytomères). Le développement change, on passe d'un développement continu (6 mois) à un développement rythmique (12 et 24 mois). Ceci donne un aspect asynchrone au développement de l'arbre de 12 et 24 mois. Le développement des plants de cette population est donc désynchronisé. Le paramètre du processus de Bernoulli est donné par la formule $P=1-V/M$ (V = variance et M = moyenne) (25).

Les valeurs du processus de Bernoulli (P) à 12 et 24 mois sont généralement proches, ce qui assure un développement stabilisé chez les trois espèces et dans chaque station. La valeur du processus de Bernoulli (P) peut aussi se calculer d'une autre manière. Dans ce cas, la variance et la moyenne sont linéairement liées par $V=(1-P)*M$ (26).

6.3.1.2. Modélisation du fonctionnement des méristèmes

Les paramètres de l'activité méristématique sont, le taux de préformation(K), la probabilité de réalisation de la préformation (b), la loi d'arrêt ou de passage de la pré à la néoformation (a), le taux de néoformation (KI) et la probabilité de faire de la néoformation (bI). Ces paramètres sont calculés après ajustement de distributions de nombre d'organes par la méthode des moindres carrés généralisée (GLQSR) avec le module Fit_GU.main du logiciel GLOUPS 2021 (GreenLab Opérateur Universel des Plantes Simulées) implémenté dans le logiciel Matlab (Annexe 13). Ces paramètres sont importants, car ils sont ensuite utilisés pour modéliser le développement et la croissance.

A cet effet, un comptage du nombre d'entre-cœud par unité de croissance et du nombre d'unité de croissance par axe ont été effectués sur 30 individus par espèce et par station à 6, 12 et 24 mois. Le comptage s'est fait du sommet vers la base des axes de chaque individu. Cependant, la saisie des données se fait de la base vers le sommet des axes observés. D'autres informations architecturales et topologiques telles que la ramification, le nombre de branche, le rang des branches et des unités de croissance ont été notés. Les nombres d'entités botaniques obtenus ont permis de calculer des fréquences et de générer des fichiers cibles (Tableau 2) lus par le modèle GreenLab (Fit_GU.main). Le module du modèle GreenLab « Fit_GU.main » implémenté dans le logiciel Matlab calcule les distributions à partir du fichier cible des fréquences (Tableau 2) et donne les paramètres de fonctionnement des méristèmes.

Tableau 2 : exemple de fichier cible des fréquences lu par le module Fit_GU.main pour la caractérisation méristématique

					>> F_GU_main			
					Targ_Loi_GU_khaya_nbrphytoparUC_2ansDaloa_ok.m			
Duration_of_law					FINAL	RESULTS		
		27	354		A=	0.709433	A=	0.65699
		7	-2		sA=	0.0614742	sA=	0.0373697
		0.78	0.9	0.73				
Rang_phyto	Frequence				ans	=		
					Obs	Bin+*Bin-	Bin-	
1	0.008474576				0	0.1618	0	
2	0.025423729				0	0.9897	0	
3	0.064971751				7	3.3233	4.0403	
4	0.048022599				4	6.6927	6.9152	
5	0.062146893				7	8.4586	7.8904	
6	0.155367232				10	7.3396	7.5027	
7	0.11299435				6	5.5989	6.4206	
8	0.093220339				6	4.5844	5.1282	
9	0.039548023				4	3.6071	3.901	
10	0.129943503				1	2.7609	2.8614	
11	0.053672316				1	2.0708	2.0406	
12	0.084745763				2	1.5293	1.4229	
13	0.036723164				2	1.1156	0.9742	
14	0.014124294				0	0.8058	0.6568	
15	0.005649718				0	0.5773	0.4372	
16	0.028248588							

A : probabilité calculée, **sA** : probabilité théorique ou simulée, **Obs** : nombre d'individu observé, **Bin+*Bin** : taux de binomial positive combiné à la binomial négative, **Bin-** : taux de binomial négative.

6.3.1.3. Modélisation du développement

La modélisation du développement rend compte d'un certain nombre de paramètres. Ces paramètres gouvernent le développement. Ce sont la probabilité de ramification (A), le rang d'apparition des premiers rameaux (Na), la puissance de ramification (Aa), la probabilité de

développement des tiges (P), la probabilité d'apparition ou de fabrication d'un phytomère par le méristème des tiges ou Bernoulli des tiges ($P=I-v/m$) (25), la probabilité de développement des branches (B), le rapport de rythme ou rythme de développement des branches par rapport au tronc (W) et le phyllochrone ou nombre de phytomère émis par le méristème en un jour. Ces paramètres de développement ont été calculés au niveau du phytomère (microcycles) et de l'UC (macrocycles) avec le module `Gloups_DevA` du modèle GreenLab implémenté dans Matlab (Annexe 14).

A cet effet, un suivi de développement sur 30 individus par espèce a été effectué dans un premier temps. Le suivi s'est effectué depuis la germination jusqu'à l'âge de 2 ans par poses d'étiquettes successives sur les nouvelles pousses chaque deux semaines. Cela a permis d'évaluer la durée d'expansion des feuilles et des entrenœuds puis les modalités d'allongement des UC (polycyclisme, pré et néoformation). Le temps de fonctionnement des feuilles T_f (comptage du nombre de feuilles vertes au-dessus des feuilles mortes sélectionnées, jusqu'au sommet des axes considérés) et le temps d'expansion des feuilles T_e (comptage du nombre d'entrenœud au-dessus de chaque feuille sélectionnée pour mesure de dimension « longueur et largeur » jusqu'à ce que les feuilles sélectionnées atteignent des dimensions stables et constantes) ont été évalués. Ces temps (T_f et T_e) ont été exprimés en cycle de développement (CD).

Dans un deuxième temps, une analyse de cime sur les individus de 2 ans (comptage du nombre d'UC du tronc et des branches) a été effectuée. Le nombre de phytomère (microcycle de développement) n'a pas été utilisé, car l'UC (macrocycle de développement) a été choisi comme entité de base du fait du fonctionnement polycyclique des axes. Le phyllochrone (nombre de jour nécessaire au méristème pour fabriquer un phytomère) de chaque espèce par station (Daloa et Korhogo) a été calculé, en divisant le nombre de phytomères émis en un (1) an par le nombre de jour de l'année (366). L'analyse de cime a permis de construire un fichier cible lu par le module « `Gloups_DevA` » du modèle GreenLab. Ce module implémenté dans Matlab calcule les paramètres de développement ci-dessus à partir du fichier d'analyse de cime (Tableau 3).

Cependant, adapté au développement rythmique (UC), l'analyse de cime ne fournit pas de façon satisfaisante l'analyse de la ramification qui est plus complexe. D'autre part, le paramètre W ne peut être estimé que si les branches ont au moins 5 UCs. Ce qui n'est pas le cas chez ces espèces au stade de développement considéré (2 ans). Il faut d'autre part choisir au hasard une branche dans chaque UC pour former la cible de l'analyse de cime.

Tableau 3 : exemple d'analyse de cime à partir du choix d'une branche par UC

nb_axi	L	nb_of_tree_size_max	na_ramif	death					
1	1	30	15	10	0				
xa1	xa2	xc1	xc2						
1	1	0	0						
ranks_for_analysis									
1000									
1									
size_of_stems_and_num_branch									
0	13	10	15	14	11	9	14	10	
0	1	1	1	1	1	1	1	1	
list_of_phytomers_along_ranks									
1	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	0	0	0	2	0	1	1	0	
3	1	0	1	0	0	2	1	2	
4	2	1	3	2	2	0	2	0	
5	0	0	2	3	0	0	1	0	
6	2	1	1	0	1	0	2	0	
7	0	0	2	3	0	0	2	0	
8	2	0	1	0	0	0	0	0	
9	1	0	1	0	0	0	0	0	
10	0	0	0	0	0	*	0	0	
11	0	*	0	0	0	*	0	*	
12	0	*	0	0	*	*	0	*	
13	0	*	0	0	*	*	0	*	
14	*	*	0	0	*	*	0	*	
15	*	*	0	*	*	*	*	*	

« 0 » signifie absence de branche ; « 1 » ou « 2 » ou « 5 » signifie présence d'une branche qui est composée de 1 ou 2 ou 5 UCs sur le rang de l'UC considérée ; « 999 » qu'on ignore le nombre d'UC d'une branche vivante à cet endroit ; « * » signifie la limite de la longueur du tronc.

6.3.2. Modélisation de la croissance

6.3.2.1. Modèles allométriques

La modélisation de la croissance avec le modèle GreenLab oblige et nécessite la destruction d'individus à cause de la biomasse sèche des organes pour l'établissement des séries organiques (paramètres source-puits). Des équations allométriques ont été établis afin de réduire le travail de collecte de données de terrain. A cet effet, 156 plants de 6, 12 et 24 mois par espèce ont été sacrifiés. La figure 26 montre un exemple d'échantillonnage phytomère par phytomère par destruction d'axe.



Figure 26 : exemple d'échantillonnage phytomère par phytomère, par destruction d'axe d'un plant de 6 mois composé de 35 phytomères chez *Khaya senegalensis*

Des individus de chaque espèce ont été décrits phytomère par phytomère et la topologie a été enregistrée en utilisant le formalisme MTG (Godin & Caraglio, 1998). Les entrenœuds et les feuilles ont été échantillonnés dans différentes conditions climatiques le long de deux catégories d'axes (tronc : A1 et branches : A2) dans l'architecture d'individus âgés de 6, 12 et 24 mois afin de maximiser la variabilité de la taille d'échantillon et de valider le modèle.

Les informations suivantes ont été enregistrées pour chaque phytomère, longueur de l'entrenœud (IL), diamètre de l'entre-nœud (ID), longueur des feuilles simples (LL), largeur des feuilles simples (LW), longueur du rachis des feuilles composées (RCL), longueur de la plus longue foliole primaire de la feuille composée ($LLtL$), largeur de la plus grande foliole primaire de la feuille composée ($LLtW$), nombre de folioles primaires (NLt), longueur de la plus grande foliole secondaire de la feuille bipennée ou foliollules ($LSeLtL$), largeur de la plus grande foliole secondaire de la feuille bipennée ou foliollules ($LSeLtW$) et nombre de folioles secondaires ou foliollules ($NSeLt$). Des paramètres supplémentaires tels que le nombre de folioles primaires (NLt) et secondaires ou foliollules ($NSeLt$), la longueur et la largeur des plus grandes folioles primaires ($LLtL$ et $LLtW$) et secondaires ou foliollules ($LseLtL$ et $LseLtW$) et la longueur du rachis des feuilles composées (RCL) ont été pris en compte. Ce fait pour parfait les modèles de

différentes manières et d'affiner l'estimation de la biomasse et de la surface foliaire. Dans certains cas, une transformation logarithmique des données a été nécessaire pour stabiliser la variance des organes et normaliser les données. La figure 27 montre un exemple de mensuration pour chaque phytomère.

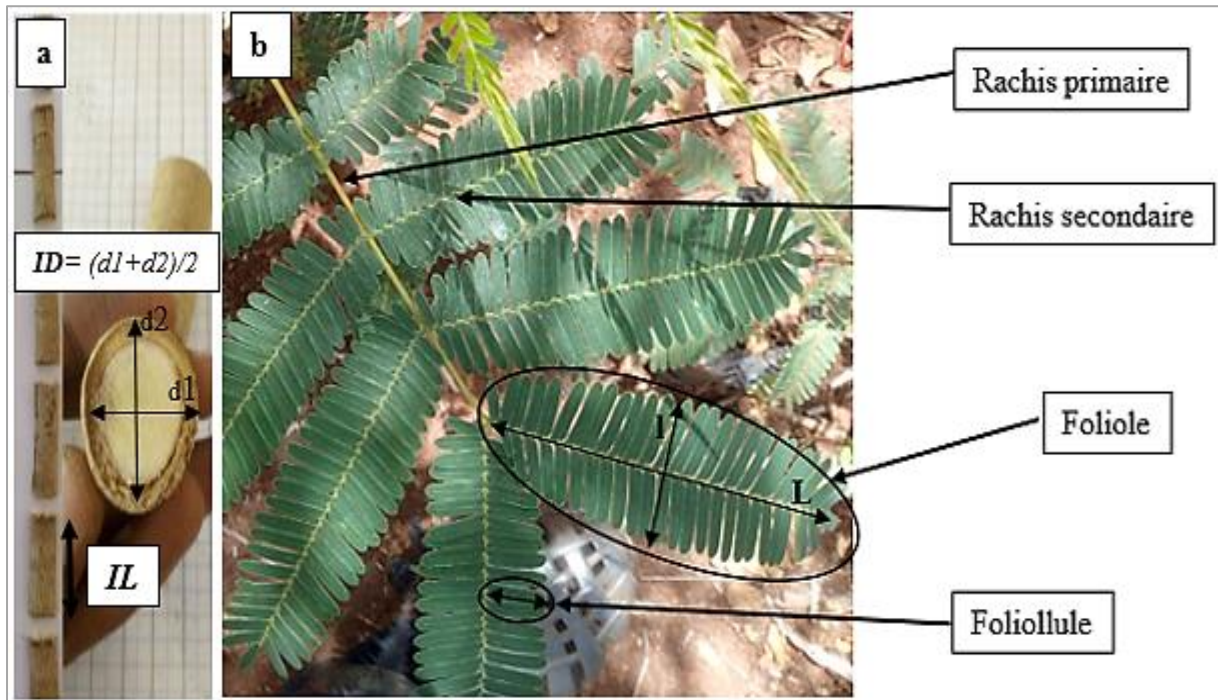


Figure 27 : photos présentant des dimensions d'entités botaniques mesurées sur un phytomère pour l'établissement d'équations allométriques.

Longueur (IL) et diamètre (ID) d'entrenœud chez *Khaya senegalensis* (a), longueur d'une foliole (L) et largeur d'une foliole (l) de feuille bipennée chez *Parkia biglobosa* (b).

Les masses fraîches des entrenœuds (IFM) et des feuilles (LFM) ont été pesées sur une balance de précision de 0,001 g, avant d'être séchées dans une étuve à 70 °C pendant 72h. Ces organes ont été lyophilisés afin d'en extraire la quantité d'eau restante causée par l'humidité ambiante. Après séchage à l'étuve, les masses sèches des entrenœuds (IDM) et des feuilles (LDM) ont été pesées en présence de silicagel sur une balance de précision de 0,001 g. Par ailleurs à l'aide d'un appareil photo numérique Nikon Coolpix 4500 de 45 mégapixels, des photographies numériques de toutes les feuilles sélectionnées ont été prises. La surface (cm^2) foliaire (LA) a été déterminée à l'aide du logiciel Image J (Rasband, 2014).

Afin d'obtenir les équations allométriques, les volumes (cm^3) d'entrenœuds (VL) ont été calculés sous forme de cylindre : $VL = \pi * IL * (\frac{ID}{2})^2$ (28). Les modèles qui estiment et prédisent la biomasse des organes secs et la surface foliaire ont été évalués à l'aide de modèles linéaires ($Y = a * X + b$) (29), logarithmiques ($Y = a * \ln(X) + b$) (30), puissance ($Y = a * X^{*b}$) (31) et

polynomiaux ($Y = a*X^2 + b*X + c$) (32). Y (biomasse des organes secs et surface foliaire) est la variable de réponse dépendante et X (volume des entre-nœuds ou dimensions des organes mesurés sur le terrain) est l'un des vecteurs des variables explicatives indépendantes (prédicteur). L'analyse de régression multiple des données a été effectuée pour chaque espèce séparément jusqu'à ce que la somme des écarts au carré soit minimisée. Les régressions avec des nuages de points très dispersés de l'intervalle de confiance ont subi des transformations logarithmiques de données. Les meilleurs modèles ont été déterminés sur la base de l'erreur quadratique moyenne d'estimation et de l'ajustement du modèle. Les modèles choisis et décrits dans la présente étude étaient les plus précis, c'est-à-dire ceux qui présentaient les plus petites erreurs standard.

6.3.2.2. Schéma et calibration du modèle de croissance

A chaque feuille est associé un anneau de section constante et courant jusqu'à la base du tronc ayant à la fois un rôle conducteur et de support mécanique. L'assemblage de ces anneaux produit le cerne externe dans les axes de la structure sur chaque saison de croissance. Ce principe est analogue à la théorie du *pipe model*. Dans une même optique, quand la surface du dernier cerne formé à un niveau donné de la tige, est proportionnelle à la surface foliaire située au-dessus de ce niveau, cela donne la loi de *Pressler*. La surface du cerne est croissante du sommet vers la base du houppier, au-delà de laquelle elle devient constante. Dans le modèle GreenLab, l'élément de cerne est distribué de façon uniforme le long du tronc de la feuille jusqu'au collet. L'assemblage des éléments produit les cernes. Ce cas est engendré par le paramètre $\alpha = 1$. Une autre distribution possible est l'allocation uniforme de l'élément de cerne produit par une feuille à tous les phytomères de l'arbre (les branches mortes exclus). Ce cas est engendré par le paramètre $\alpha = 0$. Le mixage des deux modèles permet de considérer des distributions de cernes intermédiaires $0 < \alpha < 1$. L'élément de cerne est en fait un organe avec un puit (P_c) ; sa section est constante le long des axes. Le nombre de feuilles vivantes (actives) représente le nombre d'éléments de cerne. Les éléments de cerne ne se dilatent pas ($tx = ICD$). Ceci donne : $Compartiment\ cerne = Nbr\text{-}feuille \times P_c \times Q/D$ (33).

6.3.2.3. Paramètres de croissance (source-puits)

Les paramètres de croissance sont de deux (2) types :

-Les paramètres observables, avec les quels nous pouvons faire des statistiques (volume et masse des organes, épaisseur des feuilles « \mathcal{E} », le temps d'expansion « Te » et de fonctionnement « Tf » des feuilles, la surface foliaire « Sf » etc.) ;

-Et les paramètres cachés produits par le modèle qu'à partir du calcul de l'activité photosynthétique de la plante (surface de production « Sp », la résistance des feuilles à transpiration « R », la biomasse initiale « Q_0 », les paramètres de loi d'expansion des organes ou fonction « $Bêta$ » etc). La figure 28 montre un exemple de la différence entre les deux types de paramètres de croissance utilisé dans cette étude.

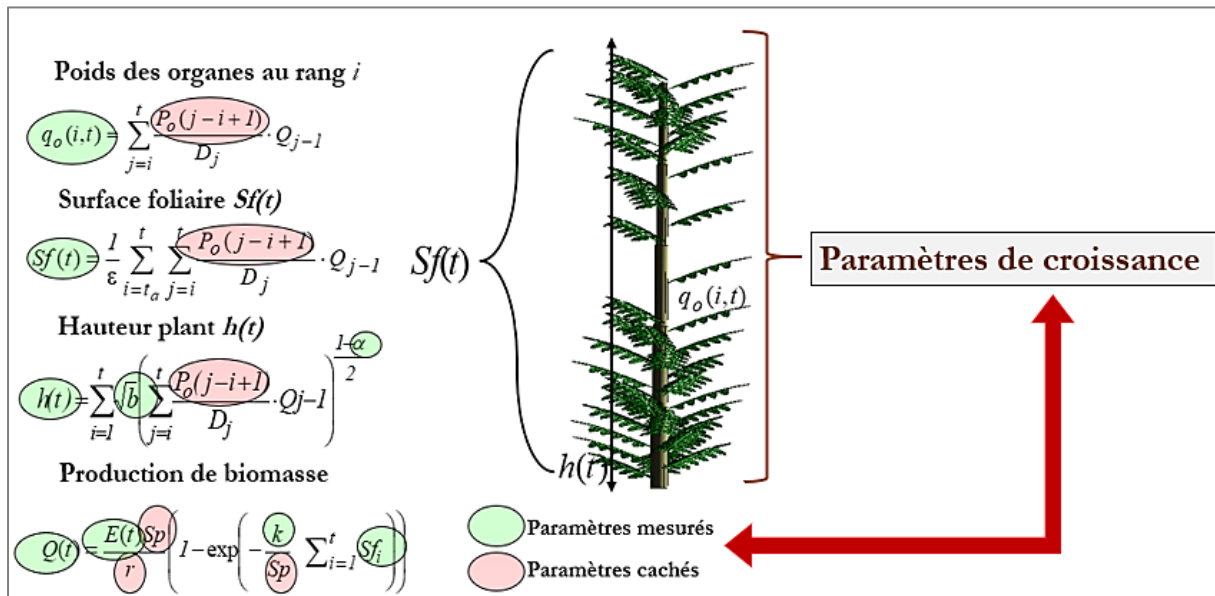


Figure 28 : image relative à l'indication des paramètres mathématique de croissance calculés par le modèle GreenLab chez *Khaya senegalensis*

Les paramètres mesurés sont colorés en vert et les paramètres cachés sont colorés en rose.

La croissance secondaire est pilotée selon des paramètres sources et puits tel que :

-Les paramètres sources : Q_0 (la biomasse initiale), R (la résistance des feuilles à la transpiration), l/R (l'efficacité climatique) et Sp (surface de production) ;

-Les paramètres puits (coût de construction) : P_l (force de puit de la feuille), P_e (force de puit de l'entre-nœud), P_c (force de puit des cernes), B_{o1} et B_{o2} (fonction « Beta » de variation de la force de puit, λ (loi de Pressler ou coefficient de diffusion des assimilés pour la croissance des cernes et moelles) et Qt (la quantité de biomasse totale produite par la plante).

6.3.2.3.1. Fonctionnement de l'automate botanique et calcul des paramètres de croissance

Dans un premier temps, le puits de chaque organe est calculé ($P_o^p(x) = p_o^p \cdot F_o\left(\frac{x}{T_o}\right)$)

$$(21), \text{ à l'aide de la loi Bêta discrétisée : } \left(F_o\left(\frac{x}{T_o}\right) = C_o \cdot \left(\frac{x+0,5}{T_o}\right)^{a-1} \cdot \left(1 - \frac{x+0,5}{T_o}\right)^{b-1} \cdot \left(\frac{1}{T_o}\right) \right)$$

(22). Ensuite, la demande de la plante est déduite à chaque nouveau cycle (

$$D(t) = \sum_{o,\varphi} \left(\sum_{i=1}^t N_o^\varphi(t-i+1) \cdot P_o^\varphi(i) \right) \quad (19) : \text{sommés des puits de tous les organes multipliés par}$$

leur probabilité d'existence) ; par la suite les offres précédentes de chaque organe de la plante

$$\text{ont été calculées } (q_o^\varphi(i,t) = \sum_{j=i}^t P_o^\varphi(j-i+1) \cdot \frac{Q(j-1)}{D(j)}) : \text{biomasse qui rentre à chaque}$$

activité photosynthétique) ; cela a donné le poids des nouveaux organes fabriqués. Le poids des

$$\text{nouveaux organes feuilles fabriqués divisé par leur épaisseur ont donné la surface de production}$$

ou foliaire ($Sf(t) = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \sum_{\varphi=1}^{mx\varphi} \sum_{i=t-t_a+1}^{\max(t,t_a)} N_a^\varphi(i) \cdot q_a^\varphi(i,t)$) (17). Cette surface a permis d'être

capable de calculer la production de la plante à l'aide de la loi de Beer (développement de la

$$\text{série de Taylor) énoncée dans la partie bibliographie de cette thèse.}$$

En ajustant bien les types de séries organiques simples et composées, nous calculons par

méthode inverse, l'activité photosynthétique totale (biomasse) de la plante à l'aide de la

formule : $Q(t) = \frac{E \cdot Sp}{r} \cdot \left(1 - \exp \left(- \frac{k}{\varepsilon \cdot Sp} \cdot \sum_{i=t-t_a+1}^{\max(t,t_a)} \sum_{\varphi=1}^{mx\varphi} N_a^\varphi(i) \cdot \sum_{j=i}^t \frac{p_a^\varphi(j-i+1) \cdot Q(j-1)}{D(j)} \right) \right)$ (18).

Tous ces paramètres ont été calculés par le module Zsub_GL_9A.m du modèle GreenLab

implémenté dans Matlab par la méthode des moindres carrés généralisé (GLSQR) (Annexe 15).

Avant le calcul des paramètres de croissance, la biomasse des entrenœuds et des feuilles

sur les axes de 30 individus à 6 mois, 1 an et 2 ans sous format MTG (Multi-scale Tree Graph,

Godin & Caraglio, 1998) a été collecté dans un premier temps (Tableau 4). Les données du

fichier MTG ont été établis à partir des équations allométriques établis.

Tableau 4 : tableau de présentation d'un exemple de fichier MTG pour l'extraction des données de croissance dans le logiciel Xplo

comments	STRING	#constat						
MTG:								
ENTITY-CODE					Pds sc entre	Pds sc feuille	surface feu	comments
/N1								
	/A1							
	^UC1							
		^e1			71,91	5,6	13,6	
		^e2			20,19	6,3	16,4	
		^e3			27,94	6,7	17,1	
		^e4			20,60			
	^<UC2							
		^e1			2,43	5,6	11,4	
			+A2					
			^UC1	^e1	1,63	4,7	11,8	
				^e2	0,65	5,4	11,4	
				^e3	0,81	6,3	15,6	
				^e4	1,51	5,6	14	
			^<UC2					
				^e1	0,11	5,4	22,5	
				^e2	0,96	4,6	9,7	
		^e2			0,96	4,9	10,2	
	^<UC3							
		^e1			0,74	4,4	9,8	

N : individu, A : Axe, UC : unité de croissance, e : entrenœud, 1,2, 3... : rang ou ordre de la base vers le sommet, Pds : poids des organes mesurés. L'ensemble appelé vertex et est précédé d'un symbole qui rend compte de la relation topologique entre les entités. Les symboles « < », « + » et « / » font respectivement référence aux relations de succession, de filiation et de décomposition. Le symbole « ^ » permet de préciser qu'une relation fait référence au vertex situé au-dessus, dans la même colonne

Les données du fichier MTG ont été utilisées pour construire des fichiers de séries organiques pour chacun des trois stades de croissance (6, 12 et 24 mois). Deux types de séries organiques ont été établis. Ce sont, les séries organiques dites « simples » établis à 6 mois (Masse sèche moyenne de feuille et d'entrenœuds à chaque rang du phytomère « micro-cycle de développement ») (Figure 29a) ; et les séries organiques dites « composées » établis à 12 et 24 mois (cumul des poids sec des compartiments entrenœuds et feuilles de l'UC « macro-cycle de développement » à chaque rang d'UC de l'axe) (Figure 29b). Ensuite, afin de réduire le temps de calcul de la croissance des individus à 12 et 24 mois, les UC ont été transformées en méta-phytomères ou macro-cycle de développement (mode phyto-Facto ; Figure 29c) à cause de la quantité énorme de phytomères produits. Cette opération réduit le développement et supprime la topologie, mais la croissance et les dimensions de l'architecture obtenues sont inchangées (Figure 29c).

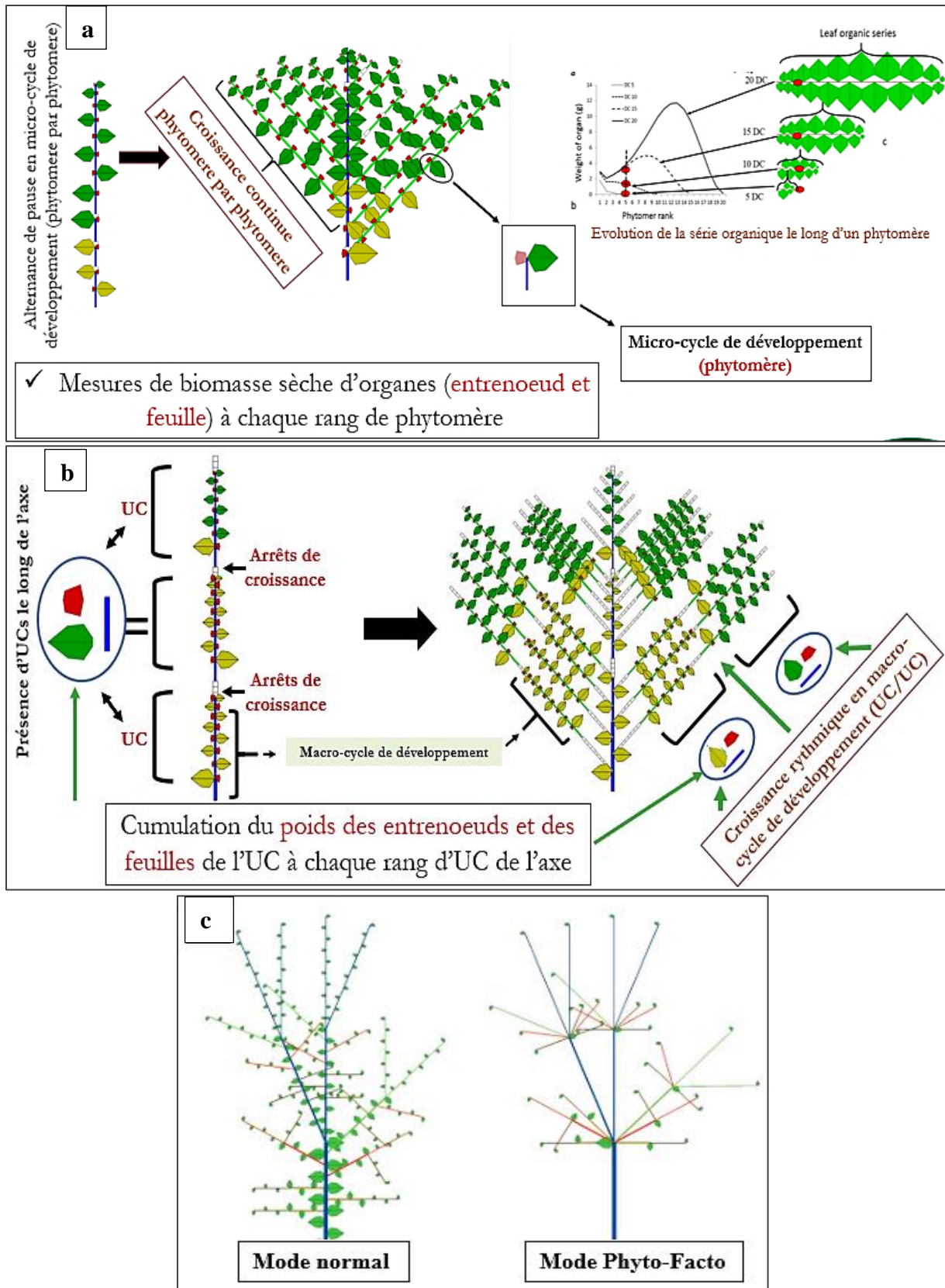


Figure 29 : présentation des constituants botaniques pour l'établissement des séries organiques et des modes de calculs utilisés pour les simulations d'architecture

Série organique simple (a) et composée (b), simulation de deux structures topologiques montrant le passage du mode normal au mode phyto-Facto (c)

Par la suite, une distribution de structures potentielles pour effectuer l'ajustement des séries organiques composées a été utilisée. Les fichiers de séries organique sont constitués de sorte à inverser la plante dans son sens de développement (le sommet des pousses sont tous dirigé vers le bas du fichier) en commençant par les feuilles et ensuite les entrenœuds (Tableau 5). Les axes de même âge (apparus au même moment) ont été regroupés en axe moyen.

Tableau 5 : exemple d'organisation d'un fichier de série organique composée en multifitting pour le calcul des paramètres source-puits à 12 et 24 mois

Information								
	Age_max	Dates_number	Gu_size					
	15		2		0			
dates_of_Plant_measurements								
	6		15					
blade_petiol_internode_fruitF_fruitM_layer_root								
	1		0		1	0	0	
Organ_production/CU								
	Age	T_Bld1	T_Bld2	T_Int1	T_Int2	T_FrF1	T_FrF2	T_FrM
	6			32		0	32	0
	15			76		69	76	69
	Blade-size/position/GU			1				
	0			6		15		
	15			-1		-0.0001		
	14			-1		-0.0001		
	13			-1		999		
	12			-1		999		
	11			-1		999		
	10			-1		999		
	9			-1		5.2		
	8			-1		12.34		
	7			-1		9.4		
	6			1.83		13.79		
	5			3.21		16.85		
	4			2.04		15.64		
	3			2.78		18.5		
	2			5.16		16.59		
	1			5.1		8.65		
	internode-size/position/GU			1				
	0			6		15		
	15			-1		345.76		
	14			-1		244.55		
	13			-1		106.88		

«5.94» ou «0.07» ou «1.57» représente la valeur poids (en g) d'un organe (feuille, phytomère, UC) ; «999» indique une donnée aberrante ou qu'on soit moins sûre de cette valeur ; «-0,0001 » indique une mortalité de l'organe ; «-1 » indique la limite de l'axe.

Ensuite un fichier représentant la carte paramétrique de l'espèce (fichier par.m = caryotype ou la carte génétique du modèle spécifique à chaque espèce par stade d'âge) est construit en intégrant les paramètres du fonctionnement méristématique et du développement calculé plus haut. Des paramètres topologiques et géométriques sont ajoutés à la carte paramétrique. Le module de calcul de croissance (Zsub_GL_9A.m) associé à ce fichier (par.m) le fichier de séries organique correspondant (tar.m) et calcul la croissance de l'espèce (Annexe 15).

La méthode des moindres carrés généralisé (GLSQR) a été une fois de plus utilisée pour calculer les moyennes et les écarts types des paramètres de croissance. Les paramètres d'entrées utilisés ont été : l'âge chronologique et topologique, le temps d'expansion et de fonctionnement des feuilles, les paramètres de fonctionnement méristématiques et de développement calculé plus haut, les lois beta des entrenœuds et feuille (expansion des organes), la surface de production et les masses sec des organes. Les paramètres de sortie du modèle ont été : la résistance des feuilles, le puits des cernes et des entrenœuds, la surface de production, le poids de la graine, la biomasse totale, la biomasse fabriquée au dernier cycle, la demande au dernier cycle, la demande totale, la demande des cernes au dernier cycle, les paramètre beta des cernes, des feuilles et des entrenœuds, puis la corrélation entre les paramètres calculés et observés.

6.3.3. Simulation de l'architecture

Le fonctionnement des méristèmes permet de générer un aspect stochastique du développement topologique et la structure potentielle, selon l'âge chronologique de chaque individu au sein d'une population d'espèce à croissance continue et/ou rythmique. Cet aspect stochastique est reproduit raisonnablement et fidèlement de manière réaliste et flexible par simulation à partir du modèle GreenLab. Le mode liste (mode simulation) du modèle donne une structure beaucoup volumineuse (structure topologique), à cause de la ramification potentielle de tous les UC à chaque cycle. Ce fait est corrigé par l'utilisation du mode matrice (mode de calcul) du modèle pour le calcul de la structure potentielle sans construction de la structure topologique. Des réalisations stochastiques du développement (structure topologique) par simulation en mode liste sont simulées et dessinées. L'affichage en mode chronologique de la structure est important à causes des pauses visuelles des méristèmes par rapport aux cycles d'activités, où les UCs sont générées. Ces pauses sont exploitées plus tard pour l'expansion des organes dans la croissance des individus.

Les paramètres de développement et de croissance calculés ont été intégrés dans un fichier de développement nommé «Targ.m». Ensuite, le module Gloup_devS qui est un simulateur de plante et de peuplements végétaux simule la plante en 2 et/ou 3 dimensions (Figure 30). La simulation permet de visualiser l'architecture de la plante à court, moyen et long terme. Elle permet de prédire le développement et la croissance future des plantes, nécessaire pour leur amélioration et l'optimisation de leur culture.

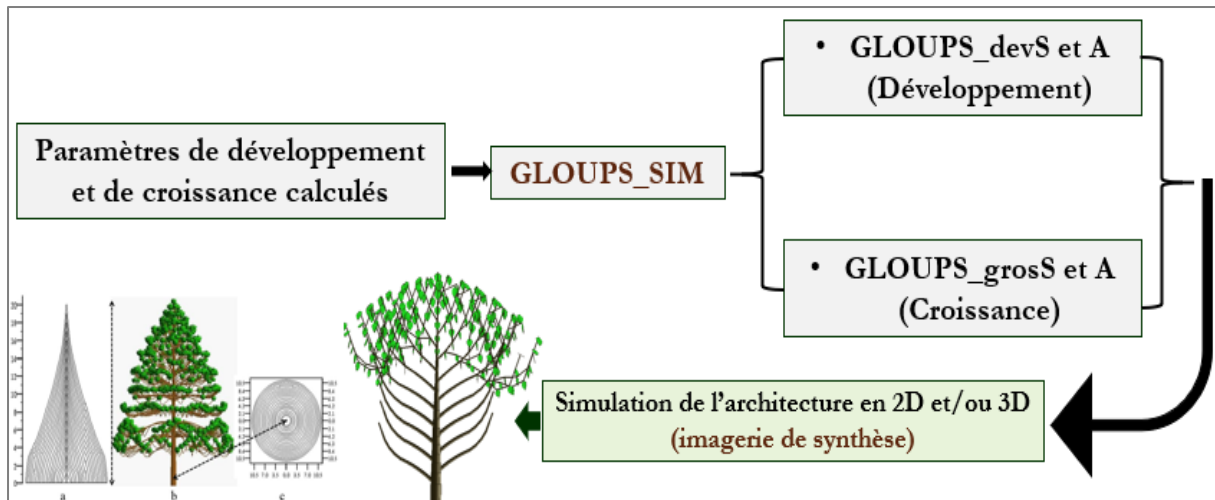


Figure 30 : image présentant le diagramme récapitulatif d'obtention des simulations d'architecture en imagerie de synthèse, à partir des paramètres de développement et de croissance calculés

Les ajustements et les simulations ont été effectués sur des individus âgés de 6 mois, 1 et 2 ans. Dans cette section, les résultats présentés dans cette thèse concernent ceux de Daloa, à cause des conditions de croissance optimale exigées par le modèle. Cependant, la croissance a été calculée pour la station de Korhogo. Les paramètres source-puits et les simulations dérivées de cette station sont présentés par les annexes 16 à 29.

6.4. Analyse statistique des données

Des analyses de variance (ANOVA) à un facteur et multivariée à deux facteurs (MANOVA) ont été utilisées pour comparer les paramètres évalués dans l'étude de la germination et croissance des semis, de l'architecture et de la modélisation. A cet effet, les tests de Student-Newman-Keuls (SNK) et de Différence Significative Minimale de Fisher (LSD) au seuil de 5% ont été utilisés avec le logiciel SAS version 9.4.

Des régressions linéaires, non linéaires et des corrélations ont été établies à l'aide du logiciel XLSTAT 2020 version 7.5 afin d'analyser les liens entre les dimensions d'organes pour l'établissement des équations allométriques.

Enfin, le logiciel Matlab 2015 a été utilisé pour le calcul des paramètres de fonctionnement, de développement et de croissance en modélisation. Il a été également utilisé pour les ajustements des séries organiques et les simulations des structures topologiques.

TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION

Chapitre 7 : Résultats

7.1. Germination, croissance et biomasse des jeunes plants des espèces cibles

7.1.1. Variation de la caractéristique des graines semées

Chez *Khaya senegalensis*, la masse des graines a varié de 0,25 à 0,37 g avec une moyenne de $0,31 \pm 0,03$ g chez les grosses graines, de 0,17 à 0,24 g avec une moyenne de $0,21 \pm 0,02$ g chez les graines moyennes et de 0,05 à 0,16 g avec une moyenne de $0,1 \pm 0,03$ g chez les petites graines. La longueur des graines a varié de 23 à 36 mm avec une moyenne de $30,7 \pm 3,2$ mm chez les grosses graines, de 18 à 32 mm avec une moyenne de $23,7 \pm 3,6$ mm chez les graines moyennes et de 14 à 24 mm avec une moyenne de $19,4 \pm 2,4$ mm chez les petites graines. La largeur des graines a varié de 17 à 25 mm avec une moyenne de $21,2 \pm 2,3$ mm chez les grosses graines, de 14 à 22 mm avec une moyenne de $17,3 \pm 2,4$ mm chez les graines moyennes et de 11 à 22 mm avec une moyenne de $14,6 \pm 3,1$ mm chez les petites graines. Quant à l'épaisseur des graines, elle a varié de 1,79 à 3,2 mm avec une moyenne de $2,6 \pm 0,38$ mm chez les grosses graines, de 1,61 à 3,59 mm avec une moyenne de $2,37 \pm 0,43$ mm chez les graines moyennes puis de 0,7 à 2,97 mm avec une moyenne de $1,95 \pm 0,55$ mm chez les petites graines (Tableau 6).

Chez *Pterocarpus erinaceus*, la masse des graines a varié de 0,08 à 0,15 g avec une moyenne de $0,09 \pm 0,01$ g chez les grosses graines, de 0,06 à 0,07 g avec une moyenne de $0,07 \pm 0,004$ g chez les graines moyennes et de 0,01 à 0,05 g avec une moyenne de $0,04 \pm 0,009$ g chez les petites graines. La longueur des graines a varié de 9,04 à 11,7 mm avec une moyenne de $9,88 \pm 0,58$ mm chez les grosses graines, de 8,33 à 9,8 mm avec une moyenne de $8,98 \pm 0,39$ mm chez les graines moyennes et de 6,15 à 8,76 mm avec une moyenne de $7,59 \pm 0,55$ mm chez les petites graines. La largeur des graines a varié de 5,4 à 6,61 mm avec une moyenne de $5,8 \pm 0,28$ mm chez les grosses graines, de 4,7 à 5,75 mm avec une moyenne de $5,34 \pm 0,23$ mm chez les graines moyennes et de 3,29 à 5,78 mm avec une moyenne de $4,82 \pm 0,48$ mm chez les petites graines. Quant à l'épaisseur des graines, elle a varié de 1,91 à 3,59 mm avec une moyenne de $2,47 \pm 0,3$ mm chez les grosses graines, de 1,88 à 2,65 mm avec une moyenne de $2,18 \pm 0,23$ mm chez les graines moyennes puis de 1,67 à 2,66 mm avec une moyenne de $1,97 \pm 0,21$ mm chez les petites graines (Tableau 6).

Chez *Parkia biglobosa*, la masse des graines a varié de 0,2 à 0,32 g avec une moyenne de $0,27 \pm 0,03$ g chez les grosses graines, de 0,16 à 0,19 g avec une moyenne de $0,17 \pm 0,01$ g chez les graines moyennes et de 0,04 à 0,13 g avec une moyenne de $0,12 \pm 0,05$ g chez les petites graines. La

longueur des graines a varié de 10 à 13 mm avec une moyenne de 11,1±0,9 mm chez les grosses graines, de 8 à 11 mm avec une moyenne de 9±0,8 mm chez les graines moyennes et de 5 à 9 mm avec une moyenne de 7,2±0,8 mm chez les petites graines. La largeur des graines a varié de 6 à 11 mm avec une moyenne de 7,9±0,9 mm chez les grosses graines, de 5 à 8 mm avec une moyenne de 6,7±0,7 mm chez les graines moyennes et de 4 à 7 mm avec une moyenne de 5,5±0,9 mm chez les petites graines. Quant à l'épaisseur des graines, elle a varié de 4,88 à 6,4 mm avec une moyenne de 5,54±0,42 mm chez les grosses graines, de 4,61 à 5,99 mm avec une moyenne de 5,13±0,34 mm chez les graines moyennes puis de 3,42 à 5,89 mm avec une moyenne de 4,71±0,62 mm chez les petites graines (Tableau 6).

Tableau 6 : caractéristiques des graines selon différentes classes triées par espèce

Espèces	Catégorie de classes	Masse (g)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)
<i>Khaya senegalensis</i>	Grosses	0,31±0,03a	30,7±3,2a	21,2±2,3a	2,6±0,38a
	Min-Maxi	(0,25-0,37)	(23-36)	(17-25)	(1,79-3,2)
	Moyennes	0,21±0,02b	23,7±3,6b	17,3±2,4b	2,37±0,43a
	Min-Maxi	(0,17-0,24)	(18-32)	(14-22)	(1,61-3,59)
	Petites	0,1±0,03c	19,4±2,4c	14,6±3,1c	1,95±0,55a
	Min-Maxi	(0,05-0,16)	(14-24)	(11-22)	(0,7-2,97)
	<i>Pr > F</i>	0,001	0,001	0,02	0,194
<i>Pterocarpus erinaceus</i>	Grosses	0,09±0,01a	9,88±0,58a	5,80±0,28a	2,47±0,30a
	Min-Maxi	(0,08-0,15)	(9,04-11,7)	(5,4-6,61)	(1,91-3,59)
	Moyennes	0,07±0,004b	8,98±0,39b	5,34±0,23b	2,18±0,23b
	Min-Maxi	(0,06-0,07)	(8,33-9,8)	(4,7-5,75)	(1,88-2,65)
	Petites	0,04±0,009c	7,59±0,55c	4,82±0,48c	1,97±0,21c
	Min-Maxi	(0,01-0,05)	(6,15-8,76)	(3,29-5,78)	(1,67-2,66)
	<i>Pr > F</i>	0,0001	0,0001	0,0001	0,0002
<i>Parkia biglobosa</i>	Grosses	0,27±0,03a	11,1±0,9a	7,9±0,9a	5,54±0,42a
	Min-Maxi	(0,2-0,32)	(10-13)	(6-11)	(4,88-6,4)
	Moyennes	0,17±0,01b	9±0,8ab	6,7±0,7ab	5,13±0,34a
	Min-Maxi	(0,16-0,19)	(8-11)	(5-8)	(4,61-5,99)
	Petites	0,12±0,05c	7,2±0,8c	5,5±0,9c	4,71±0,62a
	Min-Maxi	(0,04-0,13)	(5-9)	(4-7)	(3,42-5,89)
	<i>Pr > F</i>	0,002	0,031	0,004	0,182

Dans une même colonne les valeurs avec les lettres identiques sont statistiquement identiques au seuil de 5%. Max : maximum, Min : minimum.

La figure 31 présente la classification des graines par catégorie de taille après mesure de dimension chez les trois espèces cibles. Les petites graines présentent visuellement des aspects de mauvaises qualités que les deux autres catégories de tailles de graines.

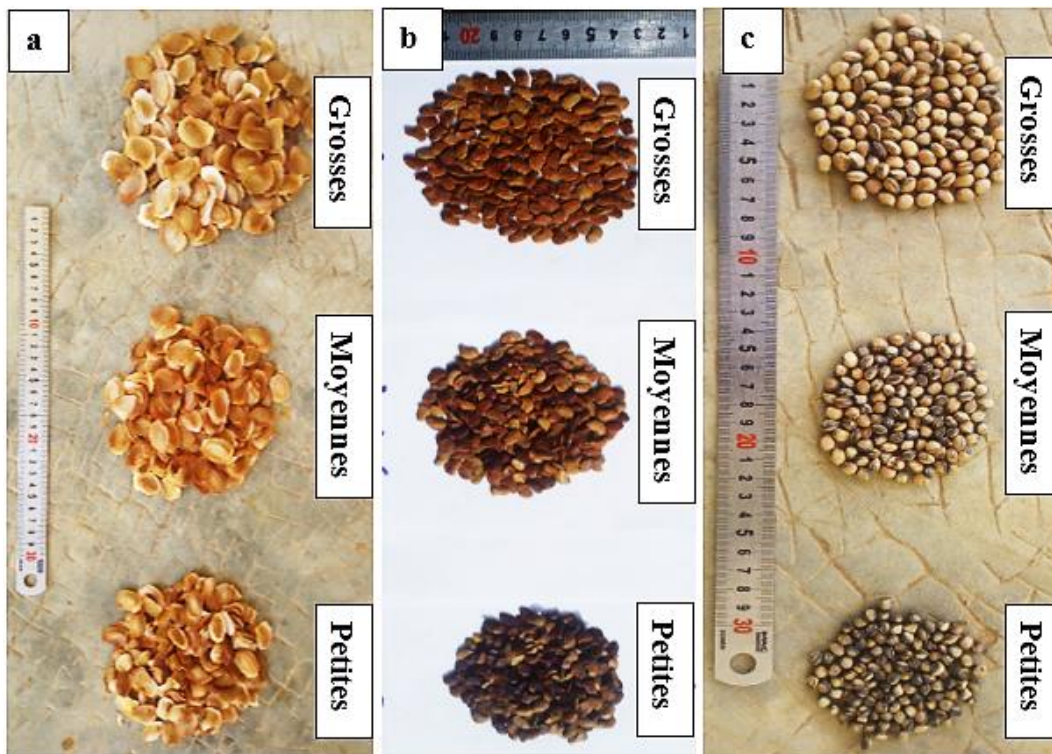


Figure 31 : classification morphométrique des graines par catégorie de taille après mesure de dimension.

Classification chez *Khaya senegalensis* (a), *Pterocarpus erinaceus* (b) et chez *Parkia biglobosa* (c)

Le tableau 7 présente les caractéristiques dendrométriques des semenciers et la répartition du nombre de graines saines par localité. Chez *Khaya senegalensis*, le nombre de graines saine récoltées a été faible à Katiola avec environ 427 graines en moyenne sur sept arbres contrairement aux trois autres localités (Tableau 7). Chez *Pterocarpus erinaceus*, le nombre de graines saines récoltées a été faible dans la localité de Katiola avec 124 graines sur 4 arbres et Ferké avec 82 graines sur 3 arbres mères (Tableau 7). Chez *Parkia biglobosa*, le nombre de graines saines collectées a été faible également dans les localités de Katiola avec 434 graines sur 15 arbres et Ferké avec 579 graines sur 12 arbres mères (Tableau 7).

Tableau 7 : provenances des graines et caractéristiques dendrométriques des semenciers utilisés

Espèces	Provenances	Coordonnées GPS		Nombre de semencier r	Diamètre à hauteur de poitrine (cm)			Hauteur (m)			Nombre de graine saine
		Longitude	Latitude		Min	Max	Moy	Min	Max	Moy	
<i>Khaya senegalensis</i>	Katiola	5°7'35,814"W	8°13'53,94"N	7	43,12	87,6	63,6±22,1 b	13,5	35	22,64±6,8 b	426,61±58,3 b
	Niakara	5°18'40,735"W	8°40'47,97"N	10	57,34	108,65	72,34±19,3 ab	16,3	28,5	18,31±7,42 b	793,4±78,6 a
	Korhogo	5°36'12,316"W	9°33'24,69"N	10	55,93	98,22	69,91±20,5 ab	24,5	39,5	28,94±8,78 a	804±104,53 a
	Ferké	5°23'43,396"W	9°36'1,87"N	9	47,69	126,77	88,3±48,4 a	21,6	42,5	31,52±11,2 a	856,11±153,5 a
	<i>Pr > F</i>						0,0131			0,021	0,001
<i>Pterocarpus erinaceus</i>	Katiola	5°7'35,814"W	8°13'53,94"N	4	12,6	32,1	22,2±8,5 b	7,5	14	9,1±4,51 a	124±10,3 b
	Niakara	5°18'40,735"W	8°40'47,97"N	7	24,5	42,3	27,51±3,5 a	9	23	13,3±2,1 a	529±34,12 a
	Korhogo	5°36'12,316"W	9°33'24,69"N	8	24,4	36,6	30,4±2,1 a	12	19	14,7±3,6 a	611±57,32 a
	Ferké	5°23'43,396"W	9°36'1,87"N	3	22,1	24,6	22,6±11,5 b	11,5	13	11,7±6,4 a	82±9,23 b
	<i>Pr > F</i>						0,0321			0,652	0,002
<i>Parkia biglobosa</i>	Katiola	5°7'35,814"W	8°13'53,94"N	15	18,4	47,23	21,84±5,1 b	6,5	23,6	12,54±3,3 b	434±87,5 b
	Niakara	5°18'40,735"W	8°40'47,97"N	14	20,6	55,81	26,7±7,34 ab	8,5	27,5	20,1±6,5 a	1026±209,6 a
	Korhogo	5°36'12,316"W	9°33'24,69"N	20	19,7	63,33	33,4±11,3 a	11,5	26,5	18,77±6,2 a	1009±303,7 a
	Ferké	5°23'43,396"W	9°36'1,87"N	12	23,56	38,11	28,7±8,6 a	13,7	21,6	17,64±8,32 ab	579,34±179,82 b
	<i>Pr > F</i>						0,016			0,037	0,001

W = Ouest; **N** = Nord; **Min** = Minimum; **Max** = Maximum; Moy = Moyenne.

7.1.2. Germination des graines

7.1.2.1. Germination des graines de *Khaya senegalensis*

Dans l'ensemble, les résultats ont montré que la taille des graines et les sites expérimentaux influencent significativement le pouvoir germinatif des graines ($P < 0,05$). Quel que soit le site, les grosses graines ont généré de meilleures valeurs pour la majorité des paramètres de germination évalués. Par ailleurs, le site de Korhogo a enregistré des taux de germination plus élevés que celui de Daloa (Figure 32).

Avec les grosses graines, le temps de latence a été de 16 jours à Korhogo contre 10 jours à Daloa. Le délai de germination des grosses graines a varié de 16 à 40 jours avec une moyenne de $22,25 \pm 5,59$ jours à Korhogo et de 10 à 41 jours avec une moyenne de $18,84 \pm 9,08$ jours à Daloa. Le temps de demi germination a été de 22 jours à Korhogo contre 17 jours à Daloa. La durée totale de la germination a été de 24 jours à Korhogo contre 31 jours à Daloa. Le taux de germination a été de 85% à Korhogo contre 75% à Daloa.

Avec les graines de taille moyenne, le temps d'attente de la germination a été de 14 jours à Korhogo contre 8 jours à Daloa. Le délai de germination des moyennes graines a varié de 14 à 40 jours autour d'une moyenne de $22,85 \pm 7,1$ jours à Korhogo et de 8 à 44 jours avec une moyenne de $19,02 \pm 7,75$ jours à Daloa. Le temps de demi germination a été de 24 jours à Korhogo contre 23 jours à Daloa. La durée totale de la germination a été de 26 jours à Korhogo contre 36 jours à Daloa. Le taux de germination a été de 76,67% à Korhogo contre 66,67% à Daloa.

Chez les graines de petite taille, le temps d'attente de la germination a été de 16 jours à Korhogo contre 7 jours à Daloa. Le délai de germination des petites graines a varié de 16 à 37 jours autour d'une moyenne de $23,93 \pm 5,58$ jours à Korhogo et de 7 à 49 jours avec une moyenne de $24,97 \pm 13,05$ jours à Daloa. Le temps de demi germination a été de 37 jours à Korhogo contre 49 jours à Daloa. La durée totale de la germination a été de 21 jours à Korhogo contre 42 jours à Daloa. Le taux de germination a été de 51,67% à Korhogo contre 50% à Daloa.

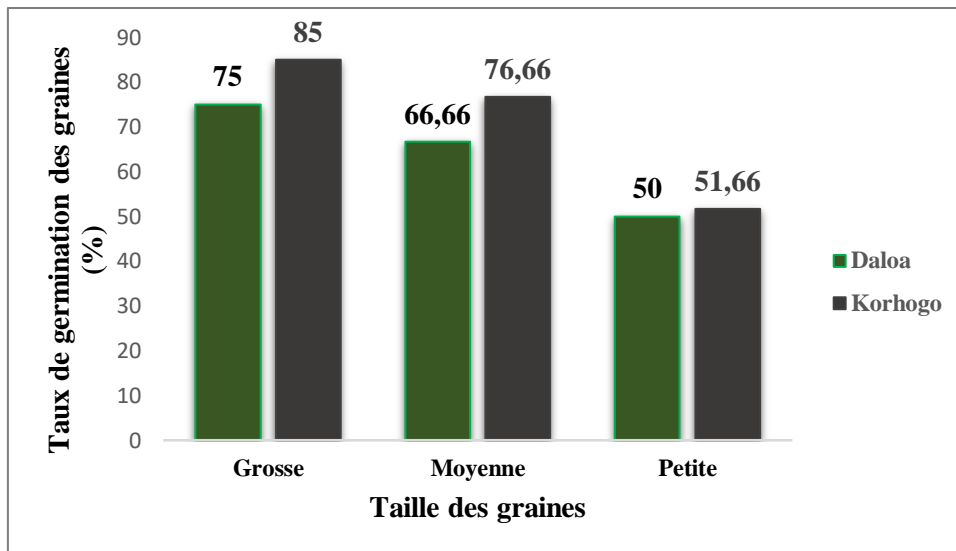


Figure 32 : taux de germination des graines de *Khaya senegalensis* selon leur taille et le site expérimental

La figure 33 montre la dynamique quotidienne de germination par catégorie de graine à Daloa (Figure 33 a) et à Korhogo (Figure 33 b). Le nombre de graines qui germe chaque 5 jours croît exponentiellement à partir du 10^{ème} jour à Daloa et 15^{ème} jour à Korhogo jusqu'au 50^{ème} et 35^{ème} jours respectivement à Daloa et Korhogo. Aucune graine ayant germé n'a été observé après ces dates à Daloa (50^{ème}) et à Korhogo (35^{ème}). Sur les deux sites d'étude, les grosses graines ont eu une dynamique de germination plus élevée que les deux autres catégories de graine (figure 33).

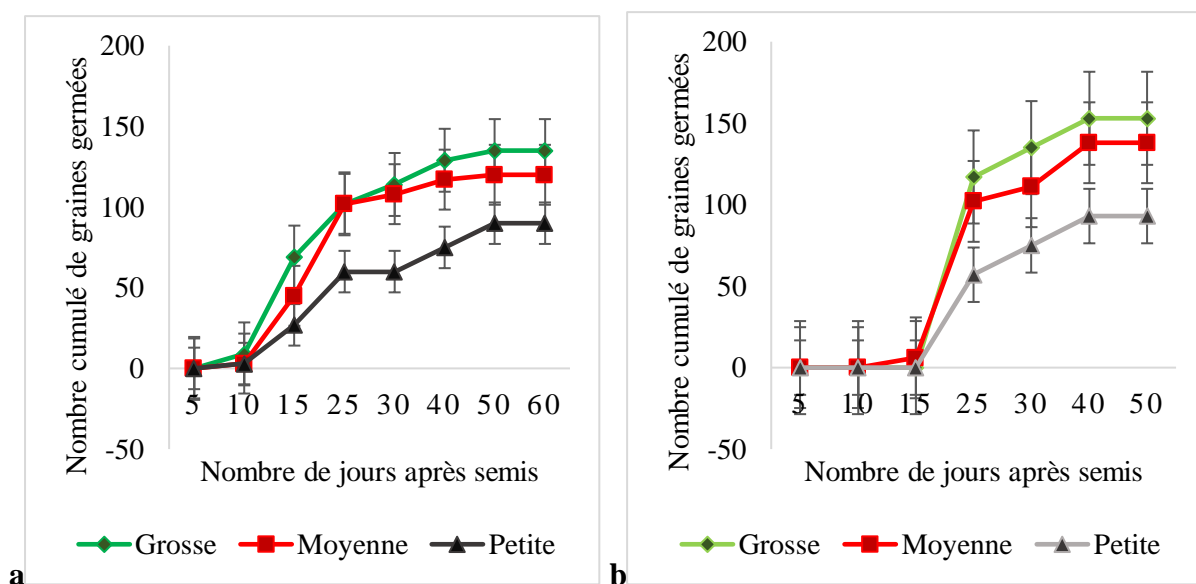


Figure 33 : vitesse de germination des catégories de graine de *Khaya senegalensis*

a : Daloa et b : Korhogo

7.1.2.2. Germination des graines de *Pterocarpus erinaceus*

De façon générale, les résultats ont montré chez *Pterocarpus erinaceus* que, toutes les variables de germination évaluées ont été meilleures chez les grosses graines dans les deux sites ($P < 0,05$). Le site de Daloa a enregistré les meilleures performances de taux de germination que celui de Korhogo peu importe la catégorie de taille de graine (figure 34).

A Daloa, les temps de latence de germination ont été de 3 jours, 5 jours et 5 jours respectivement chez les classes de graines de grande, moyenne et de petite taille. Les délais de germination ont varié de 3 à 20 jours avec une moyenne de $7,69 \pm 5,52$ jours pour les graines de grande taille, de 5 à 22 jours autour d'une moyenne de $11,28 \pm 4,19$ jours pour les graines de moyenne taille et de 5 à 25 jours avec une moyenne de $11,58 \pm 5,73$ jours pour les graines de petite taille. Quant aux temps de demi germination, ils ont été observés en 6 jours chez les grosses graines et en 11 jours chez les graines de moyenne taille. Les petites graines n'ont pas atteint 50 % de germination de leur effectif total semé durant toute l'étendue du suivi de germination. Les germinations ont duré 17 jours, 17 jours et 20 jours respectivement pour les graines de grande, moyenne et petite taille. Les taux de germinations ont été de 100 % pour les graines de grande taille, de 70 % pour les graines de moyenne taille et de 42 % pour les graines de petite taille.

À Korhogo, les temps de latence des germinations des graines de grande, moyenne et de petite taille ont été respectivement de 4 jours, de 5 jours et de 7 jour. Les délais de germinations ont varié de 5 à 25 jours avec une moyenne de $9 \pm 4,54$ jours pour les graines de grande taille, de 5 à 23 jours autour d'une moyenne de $10 \pm 4,28$ jours pour les graines de moyenne taille et de 7 à 23 jours avec une moyenne de $14,13 \pm 4,99$ jours pour les graines de petite taille. Quant aux temps de demi germination, ils ont été observés le 8^{ème} jour chez les grosses graines et le 11^{ème} jour chez les graines de moyenne taille. À Korhogo également le temps de demi germination des petites graines n'a pas atteint 50 %. Les germinations se sont étendues sur 21 jours pour les graines de grande taille, sur 18 jours pour les graines de moyenne taille et sur 33 jours pour les graines de petite taille. Les taux de germinations obtenus à Korhogo ont été de 82 % pour les graines de grande taille, de 68 % pour les graines de moyenne taille et de 34 % pour les graines de petite taille (figure 34).

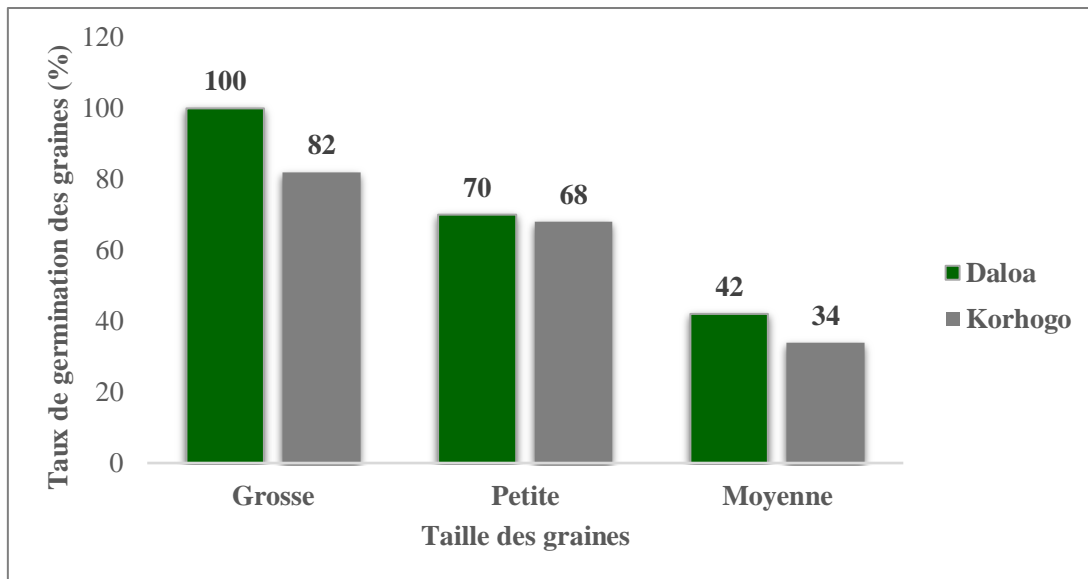


Figure 34 : taux de germination des graines de *Pterocarpus erinaceus* selon leur taille et le site expérimental

Pour chaque catégorie de taille de graines, la dynamique quotidienne de germination a été plus prononcée sur le site de Daloa (figure 35a) que sur celui de Korhogo (figure 35b).

Le nombre de graines pouvant germer chaque 5 jours est croissant jusqu'à un stade optimal, puis se stabilise vers le 20^{ème} jour chez les grosses graines et vers le 25^{ème} jour chez les moyennes et petites graines à Daloa (figure 35a) ; puis vers le 25^{ème} jour pour les trois catégories de taille de graine à Korhogo (figure 35b). Dans les deux sites d'études, les grosses graines ont plus de graines qui germent chaque 5 jours que les deux autres catégories de taille de graines (figure 35).

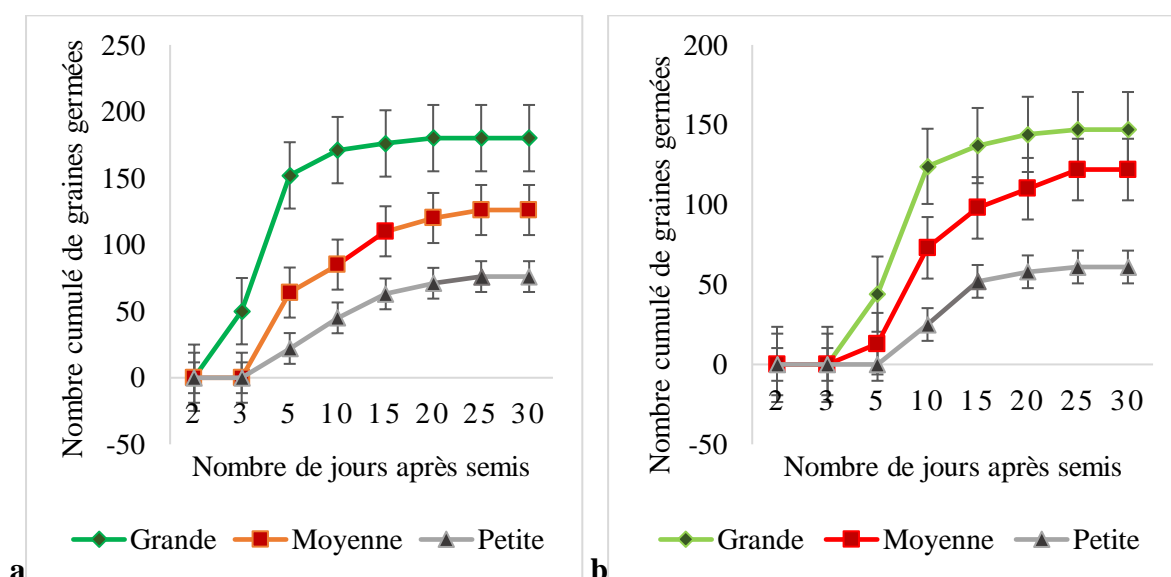


Figure 35 : vitesse de germination des catégories de graine de *Pterocarpus erinaceus*

a : Daloa et b : Korhogo

7.1.2.3. Germination des graines de *Parkia biglobosa*

Chez *Parkia biglobosa*, les résultats ont montré également que la taille des graines et le site d'étude ont une influence significative sur la germination des graines ($P < 0,05$). Chez les grosses graines, le temps de latence à la germination a été de 17 jours à Korhogo contre 11 jours à Daloa ; le délai de germination des grosses graines a varié de 17 à 56 jours autour d'une moyenne de $39,93 \pm 10,62$ jours à Korhogo et de 11 à 39 jours avec une de moyenne de $22,81 \pm 7,57$ jours à Daloa ; la vitesse de germination a été de 56 jours à Korhogo contre 34 jours à Daloa ; la durée totale de la germination a été de 39 jours à Korhogo contre 28 jours à Daloa ; le taux de germination a été de 50% à Korhogo contre 51,67% à Daloa.

Chez les graines de taille moyenne, le temps d'attente de la germination a été de 10 jours à Korhogo contre 4 jours à Daloa. Le délai de germination de chaque moyenne graine a varié de 10 à 51 jours autour d'une moyenne de $19,82 \pm 8,20$ jours à Korhogo et de 4 à 27 jours avec une moyenne de $14,57 \pm 4,29$ jours à Daloa. La vitesse de germination a été de 23 jours à Korhogo contre 19 jours à Daloa. La durée totale de la germination a été de 41 jours à Korhogo contre 23 jours à Daloa. Le taux de germination a été de 83,33% à Korhogo contre 65% à Daloa.

Chez les graines de petite taille, le temps d'attente a été de 10 jours à Korhogo contre 6 jours à Daloa. Leur délai de germination a varié de 10 à 29 jours autour d'une moyenne de $17,55 \pm 4,12$ jours à Korhogo et de 6 à 24 jours avec une de moyenne de $14,64 \pm 4,66$ jours à Daloa. La vitesse de germination a été de 24 jours à Korhogo contre 21 jours à Daloa. La durée totale de la germination a été de 19 jours à Korhogo contre 18 jours à Daloa. En définitive, le taux de germination a été de 86,67% à Korhogo contre 71,67% à Daloa (figure 36).

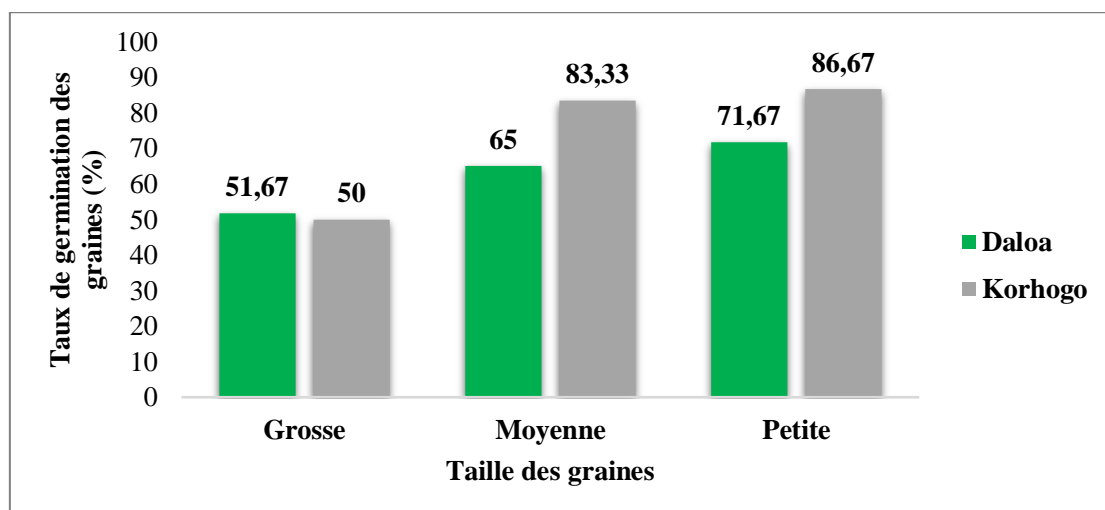


Figure 36 : taux de germination selon la taille des graines de *Parkia biglobosa* et le site expérimental

La figure 37 montre la dynamique quotidienne de germination par catégorie de graine à Daloa (Figure 37a) et à Korhogo (Figure 37b). Sur les deux stations, les petites et moyennes graines ont eu un nombre de graine ayant germé par jour plus élevé que les grosses graines. A Daloa la germination des graines se stabilisent au 25^{ème}, 30^{ème} et 40^{ème} jour respectivement chez les graines de grande, moyenne et petite taille (Figure 37a). A Korhogo la germination des graines se stabilisent au 30^{ème}, 30^{ème} et 60^{ème} jour respectivement chez les graines de grande, moyenne et petite taille (Figure 37b). Au déla de ces dates, les graines ne germent plus.

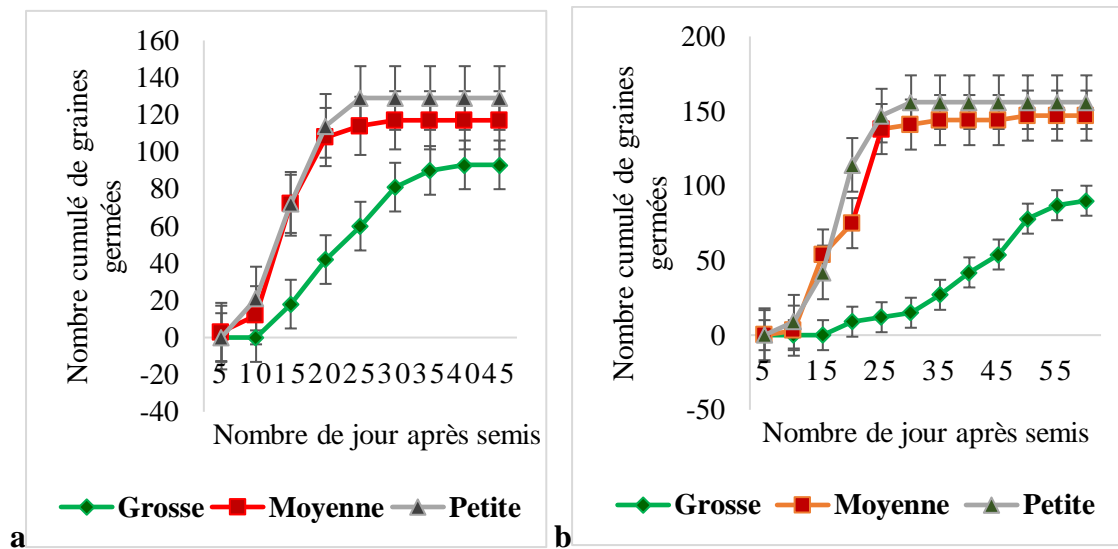


Figure 37 : vitesse de germination des catégories de graine chez *Parkia biglobosa*

a : Daloa et b : Korhogo

7.1.3. Croissance et biomasse des jeunes plants de 4 mois

7.1.3.1. Croissance et biomasse des semis chez *Khaya senegalensis* selon la taille des graines et les sites expérimentaux

La comparaison des variables de vigueur des jeunes plants selon la catégorie de graine (tableau 8 et figure 38), a montré une différence significative de la croissance des semis en fonction de la catégorie de graine ($P < 0,05$). Les graines de grande taille ont eu des hauteurs moyennes de tiges plus grandes (17,77 cm) que celles issues des moyennes (12,36 cm) et petites (8,28 cm) graines. Ces résultats sont similaires pour les paramètres de Diamètres moyens de tiges (3,07 mm contre 2,07 mm et 1,6 mm, respectivement pour les plantules issues des grandes, moyennes et petites graines), le nombre moyen de feuilles simples des tiges (7,43 contre 5,67 et 4,43 respectivement pour les plantules issues de la germination des grandes, moyennes et petites graines), le nombre moyen de feuilles composées des tiges (0,4 contre 0,11 et 0 respectivement pour les plantules issues de la germination des grandes, moyennes et petites

graines), la longueur des racines principale (13,9 cm contre 11,6 cm et 8,78 cm respectivement pour les plantules issues de la germination des grandes, moyennes et petites graines) et la variable diamètre de racine principale (2,97 mm contre 2,23 mm et 1,83 mm, respectivement pour les plantules issues de la germination des grandes, moyennes et petites graines). Les plantules issues des petites graines n'ont pas développé de feuilles composées.

Tableau 8 : paramètres de vigueur des semis de 4 mois selon la catégorie de graine chez *Khaya senegalensis*

Taille de graine	Hauteur (cm)	Diamètre (mm)	Nombre de feuille simple	Nombre de feuille composée	Longueur racine principale (cm)	Diamètre racine principale (mm)
Grosses graines	17,77 ± 3,92a	3,07 ± 2,6a	7,43 ± 1,66a	0,4 ± 1,1a	13,90 ± 2,87a	2,97 ± 0,52a
Moyennes graines	12,36 ± 2,08b	2,07 ± 0,33b	5,67 ± 1,17b	0,11 ± 0,46b	11,6 ± 2,38b	2,23 ± 0,39b
Petites graines	8,28 ± 2,11c	1,6 ± 0,35c	4,43 ± 0,85c	0 ± 0c	8,78 ± 2,43c	1,83 ± 0,44b
Pr > F	0,001	0,001	0,0041	0,007	0,001	0,0063

Dans une même colonne, les valeurs avec des lettres identiques sont statistiquement identiques au seuil de 5%.

La figure 38 présente l'influence de la taille de graine sur la morphologie des plantules de quatre mois chez *Khaya senegalensis*. Plus, la graine est grosse, plus la plantule qui en est issue est grande et mieux développée.

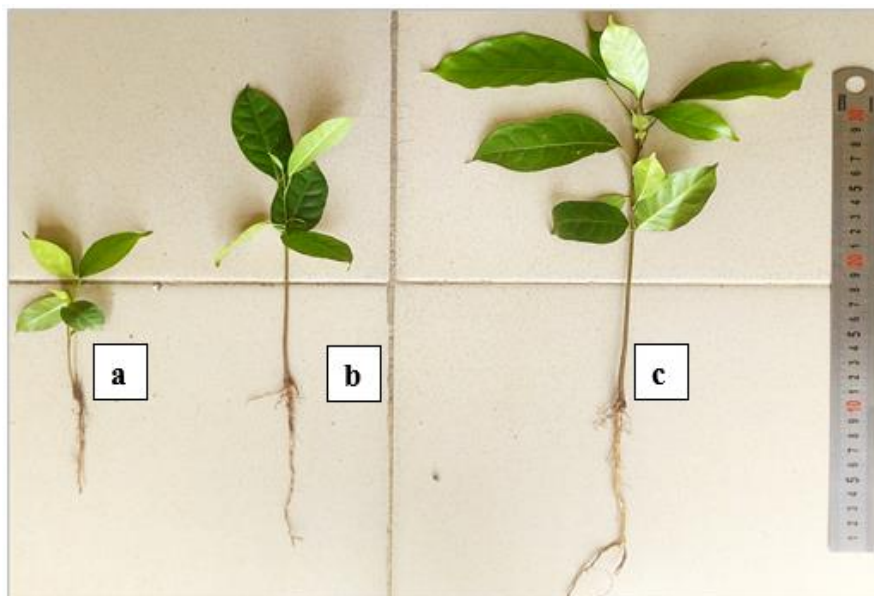


Figure 38 : vigueurs de jeunes plants de 4 mois issus de la germination des catégories de tailles de graines chez *Khaya senegalensis*

Jeune plantules issues de la germination de petites (a), moyennes (b) et grosses (c) graines

Le tableau 9 montre l'analyse de variance des paramètres de biomasse des plantules par provenance de catégorie de graine. Il montre que les paramètres évalués diffèrent d'une catégorie de graine à une autre ($P < 0,05$). Les graines de grande taille ont eu des plantules avec de grande biomasses sèches moyennes que celles issues des moyennes et petites graines pour tous les paramètres observés : masses biomasses sèches total de plantules (0,71 g contre 0,41 et 0,22 g), masses sèches total de feuille (0,32 g contre 0,2 et 0,1 g), masses sèches de tiges (0,48 g contre 0,32 et 0,04g) et de masses sèches racinaire (0,14 g contre 0,09 et 0,05 g).

Tableau 9 : biomasses sèches des jeunes plants chez *Khaya senegalensis*.

Catégorie de graine	Masse sèche total des plantules (g)	Masse sèche total des feuille (g)	Masse sèche de la tige (g)	Masse sèche de la racine (g)
Grosse	0,71 ± 0,25a	0,32 ± 0,11a	0,48 ± 0,19a	0,14 ± 0,05a
Moyenne	0,41 ± 0,12b	0,20 ± 0,06b	0,32 ± 1,52b	0,09 ± 0,04b
Petite	0,22 ± 0,11c	0,1 ± 0,05c	0,04 ± 0,02c	0,05 ± 0,02c
Pr > F	0,001	0,001	0,001	0,001

Dans une même colonne, les valeurs avec des lettres identiques sont statistiquement identiques au seuil de 5%.

En ce qui concerne l'influence du site d'étude, les résultats ont montré qu'à l'exception du diamètre des racines, les plantules obtenues dans la pépinière de Daloa ont été plus vigoureuses que celles de la pépinière de Korhogo (Tableau 10 et Figure 39). Les variables ont été de 15,85 cm à Daloa contre 10,93 cm à Korhogo pour les hauteurs des plantules, de 2,76 mm à Daloa contre 1,91 mm à Korhogo pour les diamètres des plantules. Elles ont été de 6,88 à Daloa contre 5,18 à Korhogo pour les nombres de feuilles simples, de 0,35 à Daloa contre 0,04 à Korhogo pour les feuilles composées et de 12,78 cm à Daloa contre 10,7 cm à Korhogo pour les longueurs des racines des plantules.

Tableau 10 : paramètres de vigueur des jeunes plants selon le site expérimental chez *Khaya senegalensis*

Site d'étude	Hauteur plantule (cm)	Diamètre tige (mm)	Nombre de feuille simple	Nombre de feuille composée	Longueur racine (cm)	Diamètre racine (mm)
Daloa	15,85 ± 5,07a	2,76 ± 2,39a	6,88 ± 1,87a	0,35 ± 1,02a	12,78 ± 3,71a	2,74 ± 0,64a
Korhogo	10,93 ± 3,12b	1,91 ± 0,44b	5,18 ± 1,25b	0,04 ± 0,26b	10,7 ± 2,48b	2,09 ± 0,51a
Pr > F	0,001	0,001	0,0075	0,001	0,0069	0,076

Dans une même colonne, les valeurs avec des lettres identiques sont statistiquement identiques au seuil de 5%.

La figure 39 illustre le détail de l'influence de la catégorie de graine sur la vigueur des semis selon chaque site expérimental. Chez toutes les catégories de graine, le site de Daloa a produit des jeunes plants de grande taille (figure 39).

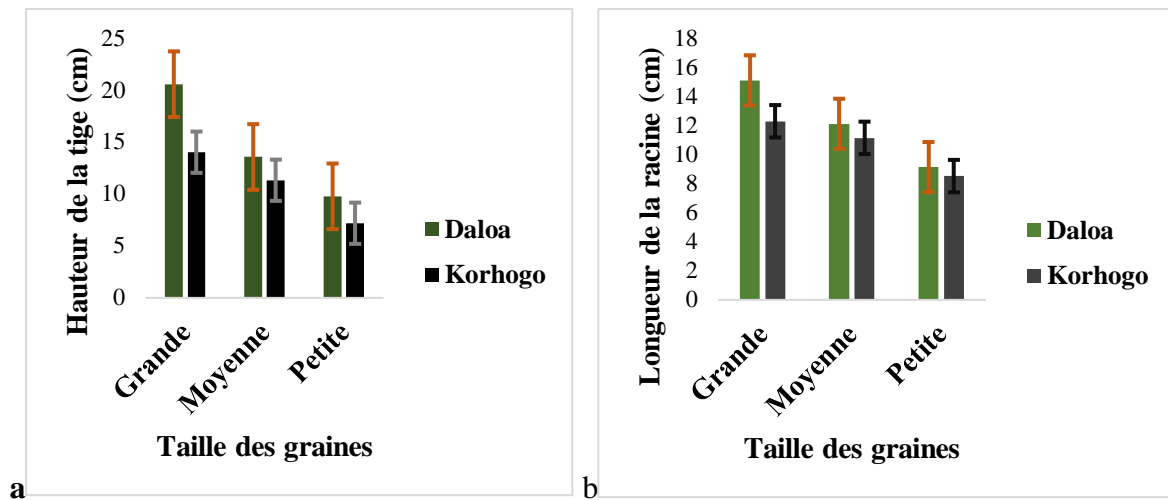


Figure 39 : dimensions des plantules selon la catégorie de taille de la graine et le site d'étude chez *Khaya senegalensis*.

a : hauteur moyenne de la tige et **b** : longueur moyenne des racines

Les plantules obtenues à Daloa ont affiché des biomasses sèches plus élevées (tableau 11) qu'à Korhogo ($P < 0,05$) pour les variables de masse sèche total des plantules (0,61 g contre 0,29 g), de masse sèche total des feuilles (0,26 g contre 0,18 g), de masse sèche de la tige (0,29 g contre 0,08 g) et de masse sèche de racine (0,12 g contre 0,08 g).

Tableau 11 : biomasse sèches des jeunes plants chez *Khaya senegalensis*, selon le site expérimental

Site d'étude	Masse sèche total des plantules (g)	Masse sèche total des feuille (g)	Masse sèche de la tige (g)	Masse sèche de la racine (g)
Daloa	0,61 ± 0,29a	0,26 ± 0,13a	0,29 ± 1,25a	0,12 ± 0,06a
Korhogo	0,24 ± 0,16b	0,18 ± 0,09b	0,08 ± 0,04b	0,08 ± 0,04b
Pr > F	0,001	0,001	0,001	0,001

Dans une même colonne, les valeurs avec des lettres identiques sont statistiquement identiques au seuil de 5%.

7.1.3.2. Croissance et la biomasse des jeunes plants chez *Pterocarpus erinaceus* selon la taille de graine et les sites expérimentaux

Chez *Pterocarpus erinaceus*, l'analyse de variance de la vigueur des semis par catégorie de graine (tableau 12), a montré que toutes les variables considérées diffèrent significativement d'une provenance de catégorie de graine à une autre ($P < 0,05$). Les plantules issues de la

germination des grosses graines ont été toutes plus développées que les plantules issues des deux autres catégories de graines (tableau 12 et Figure 40). Les valeurs des paramètres ont été pour les hauteurs de tige de 17,41 cm contre 12,33 cm et 8,82 cm respectivement chez les plantules des grosses, moyennes et petites graines. Les diamètres de tige ont été de 2,11 mm contre 1,66 mm et 1,16 mm respectivement chez les plantules des grosses, moyennes et petites graines. Le nombre de feuille simple a été de 6,92 contre 6,25 et 5,22 respectivement chez les plantules des grosses, moyennes et petites graines. Le nombre de feuille composée a été de 0,39 contre 0,05 et 0 respectivement chez les plantules des grosses, moyennes et petites graines. Les longueurs racinaires ont été de 15,9 cm contre 13,12 cm et 10,87 cm respectivement chez les plantules des grosses, moyennes et petites graines. Les diamètres racinaires ont été de 4,69 mm contre 3,61 mm et 2,42 mm respectivement chez les plantules des grosses, moyennes et petites graines.

Tableau 12 : paramètres de vigueurs des jeunes plants selon la taille de la graine *Pterocarpus erinaceus*

Taille de graine	Hauteur (cm)	Diamètre (mm)	Nombre de feuille simple	Nombre de feuille composée	Longueur racine (cm)	Diamètre racine (mm)
Grosse	17,41 ± 3,40a	2,11 ± 0,54a	6,92 ± 1,38a	0,39 ± 0,68a	15,90 ± 2,75a	4,69 ± 1,76a
Moyenne	12,33 ± 2,77b	1,66 ± 0,46b	6,25 ± 1,25b	0,05 ± 0,23b	13,12 ± 3,49b	3,61 ± 1,28b
Petite	8,82 ± 1,71c	1,16 ± 0,37c	5,22 ± 1,08c	0 ± 0c	10,87 ± 2,95c	2,42 ± 0,97c
Pr > F	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001

Dans une même colonne, les valeurs avec des lettres identiques sont statistiquement identiques au seuil de 5%.

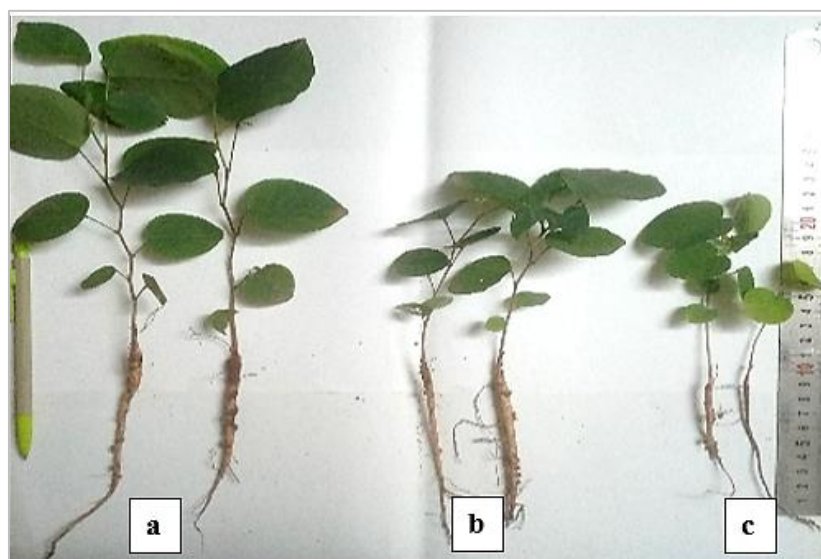


Figure 40 : vigueurs de jeunes plants de 4 mois issus de la germination des catégories de tailles de graines chez *Pterocarpus erinaceus*

Jeune plantules issues de la germination de grosses (a), moyennes (b) et petites (c) graines

Le tableau 13 montre la variance de la biomasse sèche des organes des plantules issus de la germination des trois catégories de graine. Les variables de biomasse sèche évaluées diffèrent significativement d'une provenance de graine à une autre ($P < 0,05$). Tous les semis provenant des grosses graines ont montré les masses sèches les plus élevées (Tableau 13) avec des variables de masse sèches total des plantules de 0,91 g contre 0,53 g et 0,25 g respectivement chez les plantules issues des moyennes et petites graines. La masse sèche total des feuilles de plantule a été de 0,35 g contre 0,18 g et 0,09 g respectivement chez les plantules de moyennes et petites graines. La masse sèche racinaire a été de 0,47 g contre 0,29 g et 0,12 g respectivement chez les plantules de moyennes et petites graines.

Tableau 13 : biomasse des jeunes plants selon la catégorie de graine chez *Pterocarpus erinaceus*

Catégorie de graine	Masse sèche total des plantules (g)	Masse sèche total des feuille (g)	Masse sèche de la tige (g)	Masse sèche de la racine (g)
Grosse	0,91 ± 0,58a	0,35 ± 0,24a	0,08 ± 0,04a	0,47 ± 0,35a
Moyenne	0,53 ± 0,31b	0,18 ± 0,07b	0,06 ± 0,03b	0,29 ± 0,23b
Petite	0,25 ± 0,17c	0,09 ± 0,05c	0,03 ± 0,01c	0,12 ± 0,11c
Pr > F	0,001	0,001	0,001	0,001

Dans une même colonne, les valeurs avec des lettres identiques sont statistiquement identiques au seuil de 5%.

Comme chez l'espèce précédente, les résultats ont montré que les plantules obtenues à Daloa étaient plus vigoureuses que celles de Korhogo (Tableau 14 et Figure 41). Les valeurs des paramètres évalués ont été pour les hauteurs de tige de 14,13 cm contre 11,13 cm respectivement chez les plantules de Daloa et Korhogo. Les diamètres de tige ont été de 1,78 mm contre 11,5 mm respectivement chez les plantules de Daloa et Korhogo. Le nombre de feuille simple a été de 6,7 contre 5,3 respectivement chez les plantules de Daloa et Korhogo. Le nombre de feuille composée a été de 0,25 contre 0 respectivement chez les plantules de Daloa et Korhogo. Les longueurs racinaires ont été de 12,37 cm contre 14,96 cm respectivement chez les plantules de Daloa et Korhogo. Les diamètres racinaires ont été de 4,33 mm contre 2,46 mm respectivement à Daloa et Korhogo.

Tableau 14 : vigueur des jeunes plants selon le site expérimental chez *Pterocarpus erinaceus*

Sites d'étude	Hauteur (cm)	Diamètre (mm)	Nombre de feuille simple	Nombre de feuille composée	Longueur racine (cm)	Diamètre racine (mm)
Daloa	14,13 ± 4,76a	1,78 ± 0,65a	6,7 ± 1,37a	0,25 ± 0,55a	12,37 ± 3,30b	4,33 ± 1,69a
Korhogo	11,13 ± 3,26b	1,50 ± 0,43b	5,3 ± 1,01b	0 ± 0b	14,96 ± 3,76a	2,46 ± 0,70b
<i>Pr > F</i>	0,001	0,0063	0,001	0,0041	0,003	0,001

Dans une même colonne, les valeurs avec des lettres identiques sont statistiquement identiques au seuil de 5%.

La figure 41 présente le détail de la variation de la vigueur des jeunes plants en fonction de la catégorie de graine au sein de chaque site expérimental.

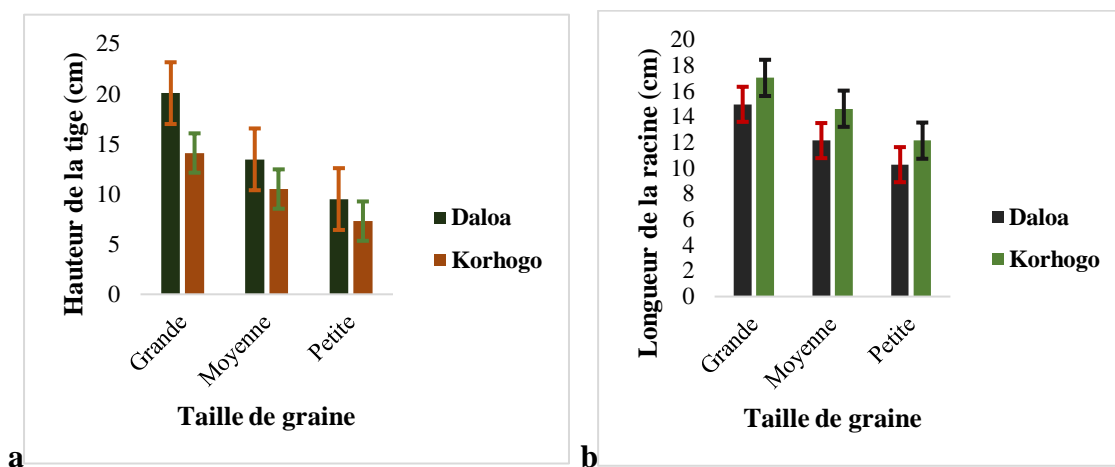


Figure 41 : dimensions des plantules selon la catégorie de la graine et le site d'étude chez *Pterocarpus erinaceus*

a : hauteur moyenne de la tige et b : longueur moyenne des racines

L'analyse de variance (Tableau 15) a montré que, les plantules obtenues à Daloa ont présenté les plus grandes biomasses sèches que celles de Korhogo ($P < 0,05$) avec des variables de masse sèche total des plantules de 0,76 g contre 0,28 g respectivement à Daloa et Korhogo. La masse sèche total des feuilles a été de 0,27 g contre 0,12 g respectivement à Daloa et Korhogo. La masse sèche racinaire a été de 0,42 g contre 0,11 g respectivement à Daloa et Korhogo.

Tableau 15 : influence du site d'étude sur la biomasse des plantules chez *Pterocarpus erinaceus*

Site d'étude	Masse sèche total des plantules (g)	Masse sèche total des feuille (g)	Masse sèche de la tige (g)	Masse sèche de la racine (g)
Daloa	0,76 ± 0,52a	0,27 ± 0,21a	0,07 ± 0,04a	0,42 ± 0,32a
Korhogo	0,28 ± 0,14b	0,12 ± 0,06b	0,04 ± 0,02b	0,11 ± 0,07b
<i>Pr > F</i>	0,001	0,001	0,001	0,001

Dans une même colonne, les valeurs avec des lettres identiques sont statistiquement identiques au seuil de 5%.

7.1.3.3. Croissance des jeunes plants chez *Parkia biglobosa* selon la taille de graine et les sites expérimentaux

Chez *Parkia biglobosa*, les résultats ont montré une différence significative de la majorité des paramètres de vigueur des jeunes plants évalués en fonction de la taille de graine ($P < 0,05$). Les plantules issues de la germination des graines de grande taille ont été plus vigoureuses (Figure 42). Le nombre de feuilles et le diamètre des racines ont été statistiquement identiques d'une catégorie de graine à une autre ($P > 0,05$). Le tableau 16 présente la comparaison des paramètres de vigueur des jeunes plants évalués par catégorie de taille de graine. Les résultats ont été pour les hauteurs de tiges de 13,18 cm, 11,53 cm et 10,09 cm respectivement pour les plantules issues des grosses, moyennes et petites graines. Ils ont été pour les diamètres des tiges de 3,22 mm, 2,47 mm et 2,25 mm respectivement pour les plantules issues des grosses, moyennes et petites graines. Ils ont été pour les nombres de feuilles composées de 3,9, de 3,98 et de 4,06 respectivement pour les plantules issues des grosses, moyennes et petites graines. Ils ont été pour les longueur racinaire de 11,51 cm, de 12,22 cm et de 10,63 cm respectivement pour les plantules issues des grosses, moyennes et petites graines. Ils ont été pour les diamètre racinaire de 2,28 mm, de 2,31 mm et de 2,05 mm respectivement pour les plantules issues des grosses, moyennes et petites graines.

Tableau 16 : vigueur des jeunes plants selon la taille des graines chez *Parkia biglobosa*

Taille de graine	Hauteur (cm)	Diamètre (mm)	Nombre de feuille composée	Longueur racine (cm)	Diamètre racine (mm)
Grosse	13,18 ± 7,13a	3,22 ± 0,65a	3,9 ± 1,54a	11,51 ± 7,38b	2,28 ± 0,89a
Moyenne	11,53 ± 5,14b	2,47 ± 0,42b	3,98 ± 1,34a	12,22 ± 4,52a	2,31 ± 0,53a
Petite	10,09 ± 4,24c	2,25 ± 0,31b	4,06 ± 1,5a	10,63 ± 4,41c	2,05 ± 0,5a
Pr > F	0,0061	0,0095	0,867	0,0083	0,7705

Dans une même colonne, les valeurs avec des lettres identiques sont statistiquement identiques au seuil de 5%.



Figure 42 : vigueurs de jeunes plants issus de la germination des catégories de tailles de graines chez *Parkia biglobosa*

Jeunes plantules issues de la germination de grosses (a), moyennes (b) et petites (c) graines

Le tableau 17 indique que les plantules provenant de la germination des grosses graines ont présenté les biomasses sèches les plus élevées comparativement à celles issues des graines moyennes et petites. Les valeurs des paramètres observés ont été de 0,46 g, 0,38 g et 0,33 g concernant la masse sèche total respectivement chez les plantules issues des grosses, moyennes et petites graines. Elles ont été de 0,26 g, 0,21 g et 0,18 g pour la masse sèche total des feuilles respectivement chez les plantules issues des grosses, moyennes et petites graines. Elles ont été de 0,09 g, 0,08 g et 0,06 g pour la masse sèche de la tige respectivement chez les plantules issues des grosses, moyennes et petites graines. Elles ont été de 0,11 g, 0,10 g et 0,09 g en ce qui concerne la masse sèche racinaire, respectivement chez les plantules issues des grosses, moyennes et petites graines.

Tableau 17 : biomasse sèche des jeunes plants selon la catégorie de taille de graine mère chez *Parkia biglobosa*

Taille de graine	Masse sèche total des plantules (g)	Masse sèche total des feuille (g)	Masse sèche de la tige (g)	Masse sèche de la racine (g)
Grosse	0,46 ± 0,39a	0,26 ± 0,22a	0,09 ± 0,05a	0,11 ± 0,1a
Moyenne	0,38 ± 0,3b	0,21 ± 0,20b	0,08 ± 0,04a	0,10 ± 0,08b
Petite	0,33 ± 0,19b	0,18 ± 0,12c	0,06 ± 0,02b	0,09 ± 0,06c
<i>Pr > F</i>	0,0011	0,026	0,0121	0,0022

Dans une même colonne, les valeurs avec des lettres identiques sont statistiquement identiques au seuil de 5%.

Les résultats ont montré que le site d'étude influence la vigueur des semis. Les plantules obtenues à Daloa se sont révélées plus vigoureuses que celles obtenues à Korhogo (Tableau 18). Tous les paramètres différaient statistiquement d'un site à l'autre ($P < 0,05$). Les résultats ont montré que la hauteur des plantules était de 16,21 cm à Daloa et 6,79 cm à Korhogo. Le diamètre des tiges était de 2,26 mm à Daloa et 2,78 mm à Korhogo. Le nombre de feuille composée était de 5,02 à Daloa et 3,08 à Korhogo. La longueur racinaire était de 15,42 cm à Daloa et 7,73 cm à Korhogo. Le diamètre racinaire était de 2,58 mm à Daloa et 1,84 mm à Korhogo.

Tableau 18 : vigueur des jeunes plants selon le site expérimental chez *Parkia biglobosa*

Site d'étude	Hauteur plantule (cm)	Diamètre tige (mm)	Nombre de feuille composée	Longueur racine (cm)	Diamètre racine (mm)
Daloa	16,21 ± 3,6a	2,26 ± 0,37b	5,02 ± 1,39a	15,42 ± 3,87a	2,58 ± 0,57a
Korhogo	6,79 ± 1,17b	2,78 ± 0,61a	3,08 ± 0,69b	7,73 ± 3,28b	1,84 ± 0,44b
<i>Pr > F</i>	0,001	0,0106	0,0061	0,001	0,004

Dans une même colonne, les valeurs avec des lettres identiques sont statistiquement identiques au seuil de 5%.

La figure 43 présente la variation de la vigueur des jeunes plants selon de la catégorie de graine et le site expérimental. Cette figure confirme que les plantules sont bien développées à Daloa qu'à Korhogo avec des hauteurs de tiges et de longueur de racine nettement plus grande.

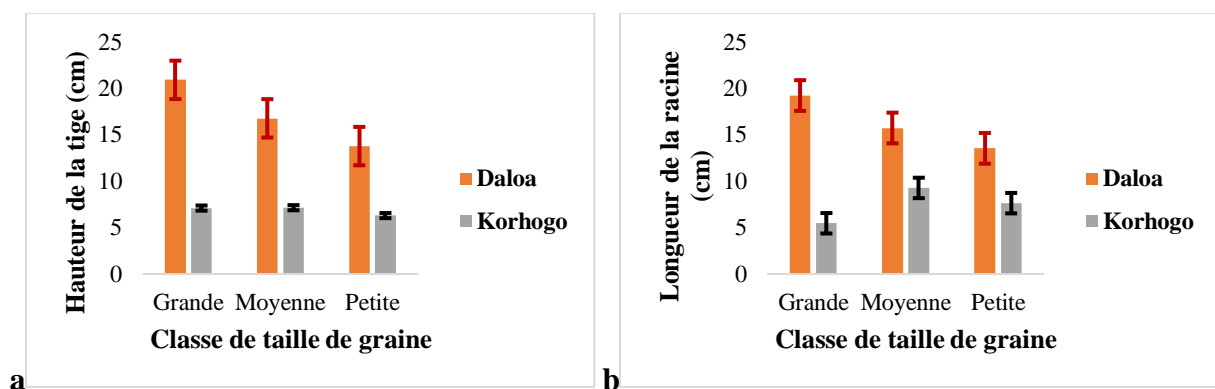


Figure 43 : dimensions des jeunes plants selon la catégorie de taille de la graine et le site d'étude chez *Parkia biglobosa*.

a : hauteur moyenne de la tige et **b** : longueur moyenne des racines

L'analyse de variance des paramètres de biomasse évalués a montré une différence significative des paramètres en fonction du site d'étude ($P < 0,05$). Les jeunes plants obtenus à Daloa ont eu des biomasses plus élevées qu'à Korhogo (tableau 19) avec des valeurs de masse sèche total de 0,6 g contre 0,17 g, de masse sèche total des feuilles de 0,34 g contre 0,08 g, de

masse sèche de tige de 0,1 g contre 0,05 g, puis de masse sèche de racine de 0,15 g contre 0,04 g.

Tableau 19 : biomasse des jeunes plants en fonction du site expérimental chez *Parkia biglobosa*

Sites d'étude	Masse sèche total des plantules (g)	Masse sèche total des feuille (g)	Masse sèche de la tige (g)	Masse sèche de la racine (g)
Daloa	0,6 ± 0,26a	0,34 ± 0,17a	0,1 ± 0,04a	0,15 ± 0,08a
Korhogo	0,17 ± 0,08b	0,08 ± 0,04b	0,05 ± 0,02b	0,04 ± 0,03b
<i>Pr > F</i>	0,001	0,001	0,001	0,001

Dans une même colonne, les valeurs avec des lettres identiques sont statistiquement identiques au seuil de 5%.

7.2. Développement architectural chez les espèces cibles

7.2.1. Caractéristiques des individus

Le tableau 20 donne le nombre et les caractéristiques dendrométriques de base des individus par âge et par type d'habitat, ainsi que les types d'axes évalués par espèce. Chez *Khaya senegalensis*, les hauteurs minimums ont varié de 0,33 à 21 m. Les hauteurs maximums ont varié de 4,8 à 37 m. Les Diamètres minimums ont varié de 0,52 à 44 cm, alors que les diamètres maximums ont varié de 8,85 à 276,08 cm. Chez *Pterocarpus erinaceus*, les hauteurs minimums ont varié de 0,27 à 17 m. Les hauteurs maximums ont varié de 3,8 à 22 m. Les Diamètres minimums ont varié de 0,38 à 41,7 cm, alors que les diamètres maximums ont varié de 9,20 à 71,4 cm. Chez *Parkia biglobosa*, les hauteurs minimums ont varié de 0,42 à 20,5 m. Les hauteurs maximums ont varié de 5,5 à 29,5 m. Les Diamètres minimums ont varié de 0,56 à 61,3 cm. Les diamètres maximums ont varié de 17,83 à 178,44 cm.

Tableau 20 : caractéristiques dendrométriques des individus en fonction de l'âge et de l'habitat chez les trois espèces cibles

	Âges	Habitats	H (m)			D ou DBH (cm)			Nbr-Indiv	Axes examinés
			Mini	Maxi	Moy	Mini	Maxi	Moy		
<i>Khaya senegalensis</i>	Jeunes arbres (0-5 ans)	Plein soleil	0,33	5,7	1,71±0,29	0,52	9,74	3,54±1,29	60	Tronc principal
		Sous-bois/Ombrage	0,52	4,8	2,54±0,15	1,18	8,85	5,39±1,07	60	Tronc principal
	Arbres adultes (6-20 ans)	Plein soleil	7,5	17	14,09±5,6	14,3	49,62	34,97±4,01	60	Branche
		Sous-bois/Ombrage	7,4	18,5	11,6±6,18	12,3	45,92	29,08±2,97	60	Branche
	Vieux arbres (21 ans ≤)	Plein soleil	21	37	31,46±4,4	44	276,08	100,02±57,	60	Branche
		Sous-bois/Ombrage	20,5	34	28,76±5,5	34,3	129,3	80,44±34,8	60	Branche
<i>Pterocarpus erinaceus</i>	Jeunes arbres (0-5 ans)	Plein soleil	0,27	3,8	1,83±0,51	0,38	9,59	3,21±0,49	60	Tronc principal
		Sous-bois/Ombrage	0,28	4,3	2,32±0,59	0,54	9,20	3,93±0,69	60	Tronc principal
	Arbres adultes (6-20 ans)	Plein soleil	10,1	15,6	12,18±2,3	21,4	36,62	27,37±4,93	60	Branche
		Sous-bois/Ombrage	10,8	14,5	11,94±3,1	14,2	38,1	24,6±6,28	60	Branche
	Vieux arbres (21 ans ≤)	Plein soleil	16,5	19,5	17,78±1,8	40,3	71,4	53,82±12,1	60	Branche
		Sous-bois/Ombrage	17	22	19,3±3,2	41,7	63	50,51±10,7	60	Branche
<i>Parkia biglobosa</i>	Jeunes arbres (0-5 ans)	Plein soleil	0,53	5,5	1,95±0,11	0,56	18,96	4,35±0,24	60	Tronc principal
		Sous-bois/Ombrage	0,42	5,8	2,56±0,05	1,26	17,83	7,06±1,22	60	Tronc principal
	Arbres adultes (6-20 ans)	Plein soleil	7,5	11	9,68±1,14	20,06	49,68	38,19±3,02	60	Branche
		Sous-bois/Ombrage	8	13,7	12,02±1,01	22,4	48,8	36,27±1,53	60	Branche
	Vieux arbres (21 ans ≤)	Plein soleil	18	31,7	25,22±3,21	61,3	178,44	85,51±6,12	60	Branche
		Sous-bois/Ombrage	20,5	29,5	25,3±3,32	60,1	115,61	76,98±7,36	60	Branche

H= Hauteur, **D or DBH**= Diamètre au collet ou Diamètre à hauteur de poitrine, **Mini**= minimum, **Maxi**= Maximum, **Moy**= Moyenne, **m**= mètre, **cm**= centimètre, **Nbr-indiv**= nombre d'individu évalué.

7.2.2. Marqueurs primaires de croissance

7.2.2.1. Variation globale des marqueurs le long des axes

Rappelons que les analyses ont portées d'une part sur les arrêts de croissance (AC) et d'autre part sur la longueur et diamètre des unités de croissance (UC) puis le nombre de phytomères des UC de tous les individus échantillonnés à chaque stade d'évolution (âge).

Chez *Khaya senegalensis*, d'une façon générale (tous facteurs confondus), le nombre d'AC présent sur les axes observés a varié de 2 à 21 avec une moyenne de $8,06 \pm 0,27$. La longueur moyenne des UC a varié de 5,15 à 67,8 cm avec une moyenne de $21,26 \pm 1,47$ cm. Le diamètre moyen des UC a varié de 0,4 à 3,81 cm avec une moyenne de $1,35 \pm 0,04$ cm. Quant au nombre de phytomères porté par les UC, il a varié de 7 à 38 autour d'une moyenne de $17,35 \pm 0,48$.

La figure 44 montre les arrêts de croissance entre deux UC successives le long d'un axe feuillé, identifiable par le biais des cataphylles. La figure 44a montre un axe constitué de deux âges physiologiques (distincts par le changement de couleur). Ces deux âges physiologiques représentent deux UC successivement formées (UC1 et UC2) et séparées par un AC. L'âge en vert est l'UC nouvelle, alors que celui en brun représente l'UC ancienne. La figure 44b montre des cataphylles présentes à la base des UC. Cela marque un arrêt d'activité du méristème (AC) et un démarrage d'une nouvelle pousse (UC2). La présence d'axes secondaires en fin d'UC du tronc indique de l'acrotonie des UC (Figure 44b).

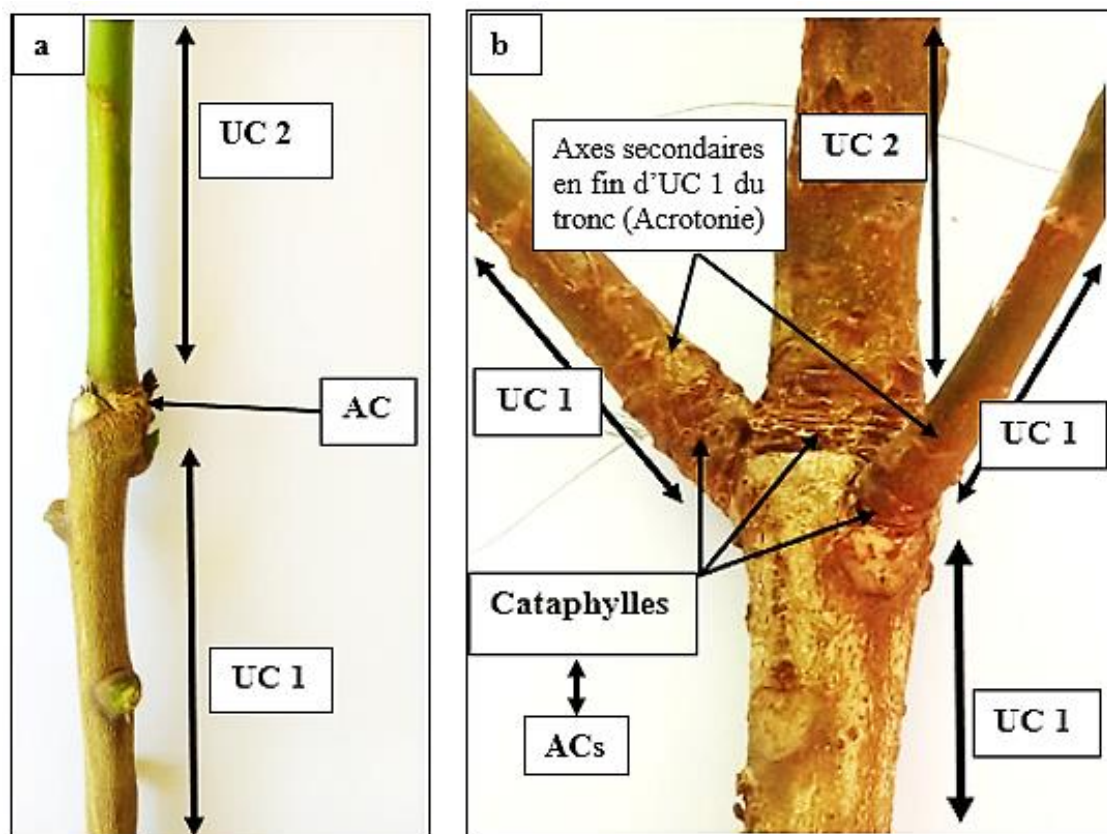


Figure 44 : images de marqueurs architecturaux chez *Khaya senegalensis*

a : arrêt de croissance (AC) délimitant deux âges physiologiques (UC1 et UC2), **b** : présence de cataphylles à la base des UCs des axes, marquant un arrêt de croissance et l'acrotonie d'UC

La figure 45 montre la répartition de la longueur et du nombre de phytomères par unité de croissance le long d'une branche composée de sept unités de croissance, observée en plein soleil sur un arbre adulte de *Khaya senegalensis* dans la localité de Korhogo. Cette figure indique l'aspect des arrêts de croissance sur un graphe de longueur successive de phytomères le long d'un axe.

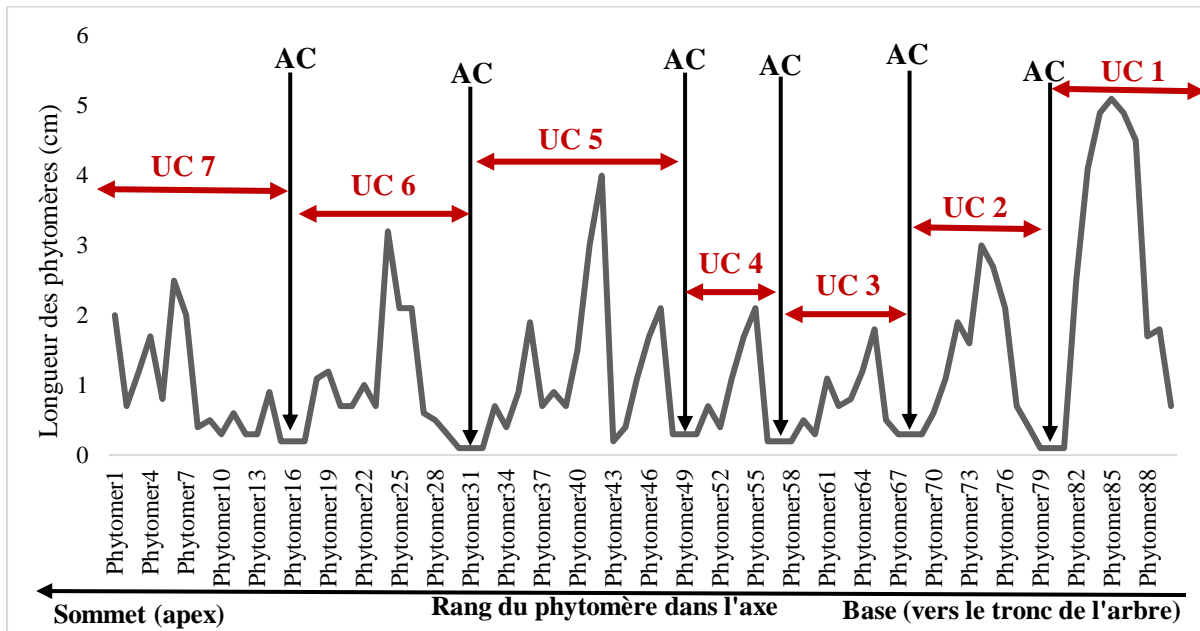


Figure 45 : variation de la taille et du nombre de phytomères par unité de croissance le long d'une branche de *Khaya senegalensis*

AC : Arrêt de croissance ou limites des unités de croissance, UC : Unités de croissance

Chez *Pterocarpus erinaceus*, le nombre d'arrêt de croissance (AC) présent sur les axes observés a varié de 2 à 19 autour d'une moyenne de $8,04 \pm 0,32$. La longueur moyenne des UCs a varié de 6,55 à 62,4 cm avec une moyenne de $22,45 \pm 0,79$ cm. Le diamètre moyen des UCs a varié de 0,32 à 3,11 cm avec une moyenne de $1,1 \pm 0,08$ cm. Le nombre moyen de phytomères par UC a varié de 4,5 à 31,75 avec une moyenne de $16,22 \pm 0,49$. La figure 46 montre l'aspect des AC et des UC le long d'un axe feuillé.

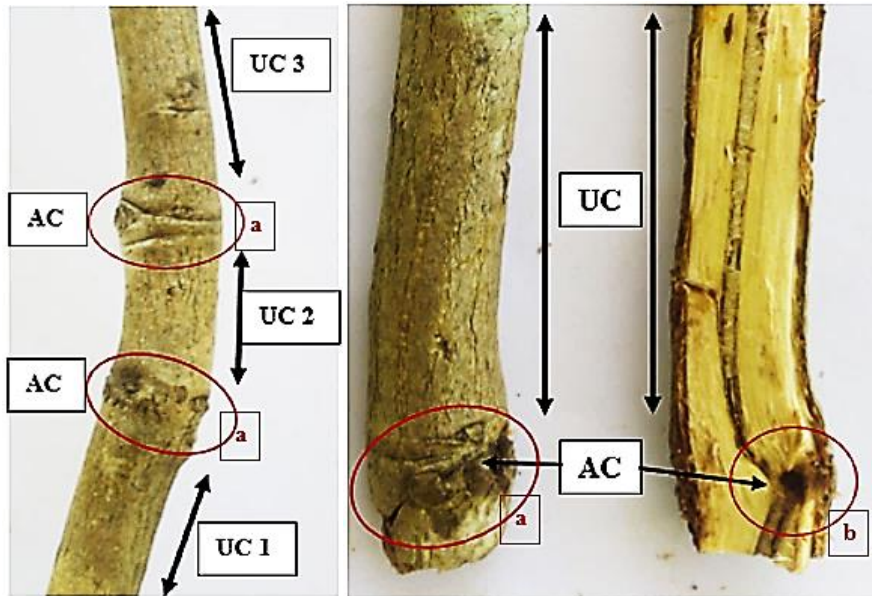


Figure 46 : images d'indicateurs d'arrêts de croissance (AC) le long d'un axe chez *Pterocarpus erinaceus*

a : cicatrices externes, b : rétrécissement de la moelle

La figure 47 présente la répartition de la longueur et du nombre de phytomères par unité de croissance, le long d'un tronc composé de sept unités de croissance observées en sous-bois sur un jeune arbre de *Pterocarpus erinaceus* dans la localité de Katiola. Cette figure indique l'aspect des arrêts de croissance sur un graphe de longueur successive de phytomères le long d'un axe.

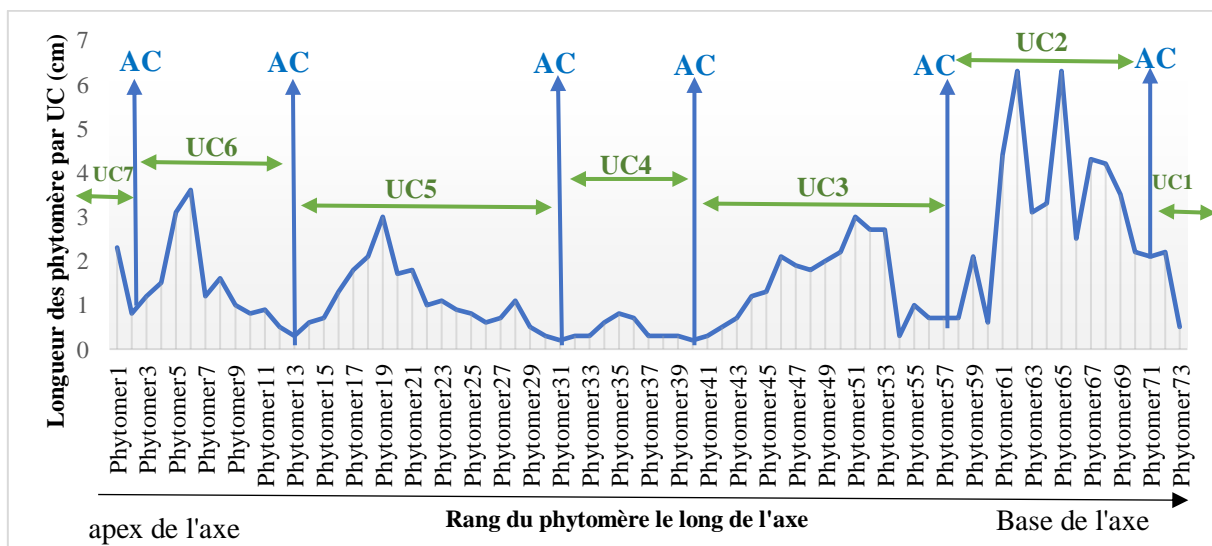


Figure 47 : variation de la taille et du nombre de phytomère par unité de croissance le long d'un axe de *Pterocarpus erinaceus*

AC : Arrêt de croissance, UC= Unité de croissance

Quant à l'espèce *Parkia biglobosa*, le nombre d'arrêt de croissance porté par les axes observés a varié de 2 à 26 autour d'une moyenne de $10,08 \pm 4,24$. La longueur moyenne des UCs a varié de 3,85 à 51,40 cm avec une moyenne de $18,57 \pm 8,15$ cm. Le diamètre moyen des UCs a varié de 0,43 à 8,81 cm avec une moyenne de $1,43 \pm 0,82$ cm. Le nombre moyen de phytomère dénombré par UC a varié de 5,5 à 33,5 autour d'une moyenne de $15,09 \pm 5,35$. La figure 48 présente la morphologie des arrêts et des unités de croissance chez *Parkia biglobosa*.

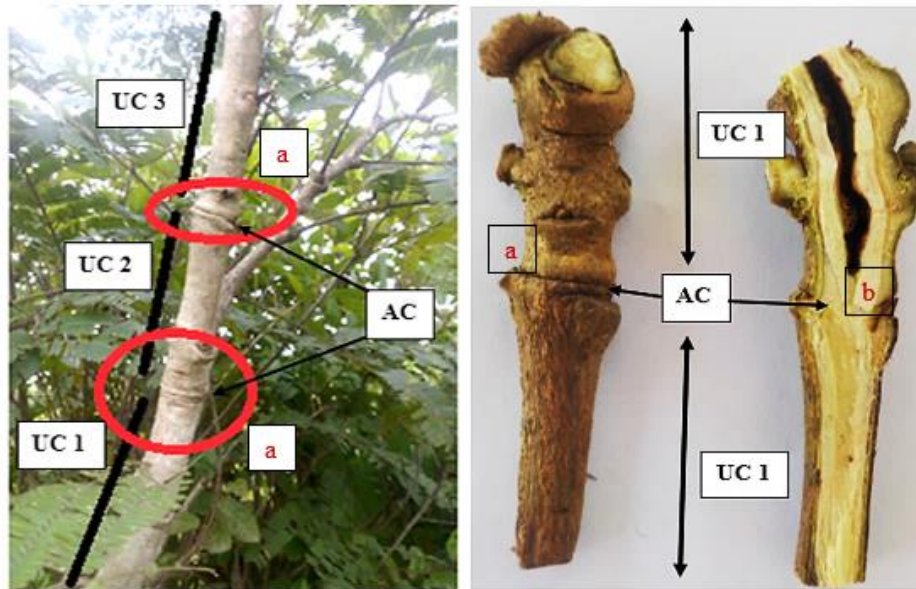


Figure 48 : images d'indicateurs d'arrêts de croissance et des unités de croissance (UC) le long d'une tige chez *Parkia biglobosa*

a : cicatrices externes et **b** : cicatrices et rétrécissement de la moelle sur une coupe longitudinale.

La figure 49 donne une allure de la répartition du nombre et de la longueur des phytomères par unité de croissance (UC), ainsi que les zones d'arrêts de croissance (AC) le long d'une branche d'arbre adulte de *Parkia biglobosa*, observés en milieu plein soleil dans la localité de Niakara. Cette figure présente également l'aspect des arrêts de croissance sur un graphe de longueur successive de phytomères le long d'un axe chez l'espèce *Parkia biglobosa*.

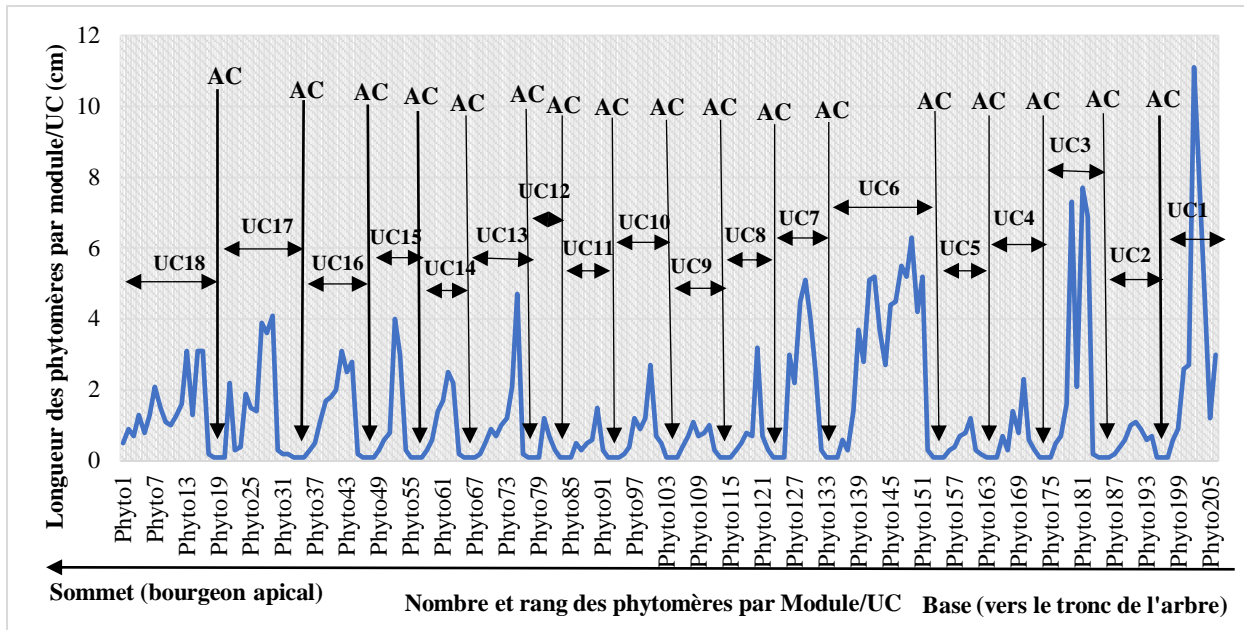


Figure 49 : variation de la taille et du nombre de phytomère par unité de croissance le long d'un axe de *Parkia biglobasa*

UC : Unité de croissance, AC : Arrêt de croissance, Phyto : Phytomère

7.2.2.2. Effet de l'habitat sur la morphologie des marqueurs

Pour tous les âges et localités confondus, les résultats (Tableau 21) ont indiqué que le nombre d'arrêt de croissance varie d'un habitat à un autre excepté chez *Parkia biglobosa* ($P > 0,05$). Chez *Khaya senegalensis*, le nombre a été en moyenne de 7,74 en plein soleil contre 9,06 en sous-bois ; ce nombre a été en moyenne chez *Pterocarpus eriaceus*, de 7,751 en plein soleil contre 8,82 en sous-bois ; chez *Parkia biglobosa*, le nombre a été en moyenne de 9,8 en plein soleil contre 10,64 en sous-bois. Le nombre de phytomère comptabilisé par unité de croissance a varié d'un habitat à un autre que chez l'espèce *Pterocarpus erinaceus* ($P < 0,05$). Il a été de 15,05 en plein soleil et de 17,84 en sous-bois. Les indices de développement favorables (IDFs) calculés chez les espèces cibles ont été plus élevés dans les habitats plein soleil quelque soit les espèces (Tableau 21). Chez *Khaya senegalensis*, ils ont été de 1,27 contre 1,1. Chez *Pterocarpus erinaceus*, ils ont été de 1,5 contre 1,22. Chez *Parkia biglobosa*, ils ont été de 1,28 contre 1,13. De plus, les nombre d'AC le long des axes dans cet habitat sont réduites. Dans l'ensemble, le milieu plein soleil a été plus favorable au développement des pousses chez les espèces. Dans l'ensemble, les individus observés en sous-bois ont présenté des difficultés de croissance (tableau 21).

Tableau 21 : influence de l'habitats sur la morphologie des marqueurs primaires de croissance

Espèces	Habitats	Nombre AC/Axe	Longueur UC (cm)	Diamètre UC (cm)	Nombre Phytomère/UC	IDfs
<i>Khaya senegalensis</i>	PI-Soleil	7,74±0,3 b	21,89±1,91 a	1,33±0,06 a	17,3±0,59 a	1,27
	So-Bois	9,06±0,55 a	19,34±1,15 a	1,39±0,06 a	17,5±0,73 a	1,1
	Pr > F	0,0379	0,2315	0,5950	0,8572	
<i>Pterocarpus erinaceus</i>	PI-Soleil	7,51±0,39 b	22,81±1,13 a	1,11±0,06 a	15,08±0,64 b	1,5
	So-Bois	8,82±0,54 a	21,94±1,01 a	1,26±0,18 a	17,84±0,71 a	1,22
	Pr > F	0,0451	0,5871	0,3739	0,0056	
<i>Parkia biglobosa</i>	PI-Soleil	9,8±0,46 a	18,73±0,88 a	1,43±0,09 a	14,61±0,53 a	1,28
	So-Bois	10,64±0,55 a	18,25±1,08 a	1,42±0,07 a	16,05±0,79 a	1,13
	Pr > F	0,2685	0,7440	0,9280	0,1277	

Les valeurs portant les mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 % dans même colonne. **PI-Soleil**= environnement dégagé et exposé en plein soleil, **So-Bois**= environnement encombré ou sous couvert forestier.

7.2.2.3. Effet de la localité sur la morphologie des marqueurs

Les analyses de variance (Tableau 22) tout habitat et âge confondus ont montré que, quelle que soit l'espèce, les variables des marqueurs observés varient statistiquement d'une localité à une autre ($P < 0,05$). Le nombre d'arrêt de croissance a été de 8,95 à Ferké, de 9,13 à Korhogo, de 8,39 à Niakara, de 6,44 à Katiola, de 10,64 à Bouaké et de 5,5 à Toumodi chez l'espèce *Khaya senegalensis* ; chez *Pterocarpus erinaceus*, ce nombre a été de 10,24 à Ferké, de 8,5 à Korhogo, de 9,28 à Niakara, de 7 à Katiola, de 8,21 à Bouaké et de 8,35 à Toumodi. Chez *Parkia biglobosa*, ce nombre a été de 9,39 à Ferké, de 10,14 à Korhogo, de 11,32 à Niakara, de 10,63 à Katiola, de 11,12 à Bouaké et de 12,2 à Toumodi. Les valeurs des indices de développements favorable (*IDf*) calculées, combinées aux nombres d'arrêt de croissance des axes indiquent que les localités de Bouaké (*IDfs* : 1,86) et Katiola (*IDfs* : 1,5) sont les zones favorables au développement des pousses chez *Khaya senegalensis*. Les localités de Bouaké (*IDfs* : 1,7) et Toumodi (*IDfs* : 1,54) sont les zones favorables pour l'espèce *Pterocarpus erinaceus*. Chez l'espèce *Parkia biglobosa*, les zones favorables sont les localités de Korhogo (*IDfs* : 1,12), Katiola (*IDfs* : 1,48) et Bouaké (*IDfs* : 1,55).

Tableau 22 : influence de la localité sur la morphologie des marqueurs primaires de croissance

Espèces	Localités	Nombre AC/Axe	Longueur UC (cm)	Diamètre UC (cm)	Nombre Phytomère/UC	IDs
<i>Khaya senegalensis</i>	Ferké	8,95±0,5 ab	16,68±1,51 c	1,44±0,07 b	15,77±0,68 b	1,06
	Korhogo	9,13±0,88 bcd	18,75±1,72 c	1,39±0,1 b	17,64±0,86 ab	1,06
	Niagara	8,39±0,35 bcd	18,09±1,5 c	1,21±0,06 b	20,46±1,23 a	0,88
	Katiola	6,44±0,87 d	25,82±2,87 b	1,4±0,1 b	17,19±1,17 ab	1,5
	Bouaké	10,64±0,73 a	29,68±11,14 a	1,91±0,26 a	15,89±1,33 b	1,86
	Toumodi	5,5±0,38 cd	19,65±2,41 c	1,07±0,09 b	14,44±1,18 b	1,36
	<i>Pr>F</i>	0,001	0,001	0,001	0,001	
<i>Pterocarpus erinaceus</i>	Ferké	10,24±0,94 a	22,94±1,49 bc	1,19±0,1 ab	17,05±1,07 ab	1,35
	Korhogo	8,5±0,61 ab	20,49±1,7 bc	0,98±0,06 ab	15,62±0,97 b	1,31
	Niagara	9,28±0,62 a	25,83±1,74 bc	1,25±0,09 ab	22,29±1,02 a	1,15
	Katiola	7±1,13 c	20,56±1,3 bc	1,02±0,08 ab	15,09±1,29 c	1,36
	Bouaké	8,21±1,08 ab	27,45±4,08 a	1,37±0,19 ab	16,09±2,06 c	1,7
	Toumodi	8,35±0,59 ab	25,17±2,12 ab	1,8±0,46 a	16,39±0,64 b	1,54
	<i>Pr>F</i>	0,001	0,0015	0,0166	0,001	
<i>Parkia biglobosa</i>	Ferké	9,39±1,61 b	16,32±2,02 bc	1,51±0,08 ab	16,75±1,03 ab	0,97
	Korhogo	10,14±0,55 abc	13,81±1,3 c	1,13±0,09 b	12,36±0,94 bc	1,12
	Niagara	11,32±0,87 a	19,69±1,51 b	1,49±0,37 ab	20,69±0,62 a	0,95
	Katiola	10,63±0,69 abc	23,01±1,35 ab	1,67±0,05 ab	15,5±0,69 b	1,48
	Bouaké	11,12±1,21 a	24,59±2,13 a	1,76±0,14 a	15,84±1,46 b	1,55
	Toumodi	12,2±0,52 a	20,55±1,15 b	1,93±0,03 a	15,28±0,37 b	0,79
	<i>Pr>F</i>	0,001	0,001	0,0089	0,001	

Les valeurs portant les mêmes lettres dans une même colonne ne sont pas différentes au seuil de 5 %.

7.2.2.4. Effet de l'âge des individus sur la morphologie des marqueurs

L'analyse de variance a montré que chez *Khaya senegalensis*, la longueur des UC et le nombre de phytomère par UC diffèrent d'un âge à un autre ($P<0,05$), alors que le nombre d'AC par axe et le diamètre moyen des UCs restent identiques ($P>0,05$). La longueur des UC est plus élevée chez les individus jeunes (23,45 cm) et faible chez les adultes (17,38 cm) et vieux (18,02). Quant au nombre de phytomère par UC, il croit des plus jeunes individus (16,31) aux adultes (17,75) et plus vieux (19,77) (tableau 23). L'âge influence les marqueurs primaires de croissance chez cette espèce (tableau 23).

Chez *Pterocarpus erinaceus*, la majorité des paramètres évalués (tableau 23) ne varie pas statistiquement d'un âge à un autre ($P>0,05$), excepté le nombre de phytomère porté par les UCs qui croit des plus jeunes (14,99) aux adultes (17,28) et vieux (20,26) individus ($P<0,05$). L'âge influence aussi le nombre de phytomère par UC chez cette espèce ($P>0,05$).

Chez *Parkia biglobosa*, les résultats ont montré que le nombre d'AC, la longueur des modules et le nombre de phytomère par UC diffèrent significativement d'un âge à un autre ($P<0,05$). Ce nombre a été de 10,61, 11,21 et de 9 respectivement chez les individus vieux, adultes et Jeunes. Le nombre d'AC par axe est plus élevé chez les arbres adultes (11,21), tandis que la longueur moyenne de ces UCs est plus élevée chez les arbres plus jeunes (20,52 cm contre 16,94 cm chez les adultes et 16,92 cm chez les vieux) (Tableau 23). Le diamètre moyen des UCs reste statistiquement identique quel que soit l'âge ($P>0,05$) (Tableau 23). Les arbres vieux (17,34) et adultes (15,82) présentent des nombres d'entrecœuds par Module plus élevés que ceux des plus jeunes (13,56) arbres (Tableau 23). Chez *Parkia biglobosa*, l'âge des individus influence également les marqueurs primaires de croissance ($P<0,05$).

Tableau 23: influence de l'âge des individus sur la morphologie des marqueurs architecturaux

Espèces	Agés	Nombre AC/Axe	Longueur UC (cm)	Diamètre UC (cm)	Nombre Phytomère/UC
<i>Khaya senegalensis</i>	Vieux-arbre	8,25±0,33 a	18,02±1,09 b	1,37±0,05 a	19,77±0,82 a
	Arbre-adulte	8,25±0,43 a	17,38±1,42 b	1,33±0,08 a	17,75±1,01 ab
	Jeune-arbre	7,95±0,41 a	23,45±2,28 a	1,34±0,06 a	16,31±0,64 b
	Pr>F	0,87	0,0213	0,9463	0,0103
<i>Pterocarpus erinaceus</i>	Vieux-arbre	9,22±0,54 a	22,9±1,76 a	1,09±0,09 a	20,26±1,43 a
	Arbre-adulte	7,63±0,34 a	24,44±1,4 a	1,25±0,07 a	17,28±0,71 b
	Jeune-arbre	7,94±0,47 a	21,66±1,06 a	1,16±0,12 a	14,99±0,62 c
	Pr>F	0,3324	0,3520	0,8528	0,0007
<i>Parkia biglobosa</i>	Vieux-arbre	10,61±0,52 ab	16,92±0,97 b	1,53±0,06 a	17,34±0,90 a
	Arbre-adulte	11,21±0,48 a	16,94±1,18 b	1,59±0,16 a	15,82±0,59 a
	Jeune-arbre	9±0,63 b	20,52±1,1 a	1,26±0,07 a	13,56±0,72 b
	Pr>F	0,0174	0,0336	0,0755	0,0027

Les valeurs portant les mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 % dans même colonne.

7.2.2.5. Effet des espèces cibles sur la morphologie des marqueurs

Les résultats ont montré dans le tableau 24 que, la morphologie des marqueurs varie d'une espèce à une autre ($P<0,05$). Les espèces *Khaya senegalensis* et *Pterocarpus erinaceus* ont des marqueurs morphologiques statistiquement comparables, mais différent de l'espèce

Parkia biglobosa. Le nombre moyen d'arrêt de croissance a été de 8,06 chez *Khaya senegalensis*, de 8,04 chez *Pterocarpus erinaceus* et de 10,07 chez *Parkia biglobosa*. Quant à la longueur moyenne des UCs, elle a été de 22,45 cm, de 22,45 cm et de 18,57 cm respectivement chez *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* et *Parkia biglobosa*. Le diamètre moyenne des UCs a été de 1,35 cm, de 1,17 cm et de 1,43 cm respectivement chez *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* et *Parkia biglobosa*. Le nombre moyen de phytomères a été de 17,35 chez *Khaya senegalensis*, de 16,22 chez *Pterocarpus erinaceus* et de 15,09 chez *Parkia biglobosa*.

Tableau 24 : comparaison des marqueurs primaires de croissance entre *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* et *Parkia biglobosa*

Espèces	Nombre- AC/axe	Longueur-UC (cm)	Diamètre- UC (cm)	Nombre- phytomère/UC
<i>Khaya senegalensis</i>	8,06±0,27 b	22,45±1,47 a	1,35±0,04 ab	17,35±0,48 a
<i>Pterocarpus erinaceus</i>	8,04±0,32 b	22,45±0,79 a	1,17±0,08 b	16,22±0,49 a
<i>Parkia biglobosa</i>	10,07±0,35 a	18,57±0,69 b	1,43±0,07 a	15,09±0,44b
Pr>F	0,0001	0,0094	0,0229	0,0035

Les valeurs portant les mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 % dans même colonne.

Les détails près de l'influence des facteurs explorés ci-dessus (habitats, localités et habitats-localités) sur la morphologie des UC à chaque stade d'âge (jeunes, adultes et vieux) pour chaque espèce cible sont présentés par les annexes 4 à 12.

7.2.3. Diagrammes et caractéristiques architecturales chez les espèces cibles

7.2.3.1. Mise en place de l'unité architectural chez *Khaya senegalensis*

Au stade jeune (0 à 5 ans), *Khaya senegalensis* se présente comme un petit arbre monopodial (Figure 50). Sa direction de croissance est verticale. La phyllotaxie est Alterne spiro-distique. Les feuilles sont dans un premier temps de forme pennerves simples entières et lancéolées à composées imparipennées. Les feuilles composées imparipennées se transforment plus tard en feuilles composées paripennées par régression et disparition de la foliole insérée en fin du rachis principale. Le tronc (A1) met en place sa première unité de croissance (UC) au bout de 5 mois en moyenne ; par la suite le méristème terminal met en place de manière successive des UCs avec une rythmicité diffuse. En cas de traumatisme (mort du bourgeon terminal), l'axe relais suit le prolongement de l'axe porteur. L'individu devient un

pseudomonopode (sympode monochasial) dans ce cas. Lorsque le bourgeon n'est pas attaqué (condition optimale), la croissance du tronc (axe A1) est verticalement indéfinie. Le tronc est dressé et marqué par des UC polycycliques bien visible (Figure 50).

Les branches (axe A2) se mettent en place dans le sommet de l'arbre en fin d'UC (acrotonie prononcée). La ramification est retardée (absence d'hypopodium) avec des cataphylles bien regroupés à la base des pousses débouffées. Les branches sont monopodiales, à direction de croissance verticale (orthotrope) à oblique (agéotrope), puis tantôt rythmique tantôt diffuse (Figure 50). La ramification des A3 sur les A2 est différée avec une direction de croissance préférentiellement horizontale (amphitrope). Les feuilles des branches ont des phyllotaxies alterne spiro-distique (axe orthotrope) et alterne distique (axe agéotrope). L'arbre perd ses feuilles dans la partie inférieure des axes. Au stade jeune, l'arbre présente une structure encore simple, non complexe et peut présenter trois ordres de ramification et deux types d'axe (tronc et branche).

Au stade adulte (6 à 20 ans), l'architecture porte quatre (04) catégories d'axes (tronc, branche, rameaux longs et rameaux courts) et 5 à 6 ordres de ramification correspondant à l'unité architecturale de l'espèce (Figure 50). De petites inflorescences sous forme de grappe apparaissent sur les rameaux courts en position latérale au bout de 7 à 8 ans après plantation. Les rameaux courts sont portés par tous les ordres de ramification, mais la floraison n'a lieu que sur les axes A3, A4, A5 en majorité et sur les courts rameaux, à la périphérie de la couronne de l'arbre. Aucune autre catégorie d'axe supplémentaire n'apparaît durant l'ontogénèse. Le tronc constitue un axe unique au sein du système moyennement complexe et ramifié. Dans la couronne de l'arbre, les axes A3, A4 et A5 ont des fonctions spécialisées (photosynthèse et reproduction). C'est dans ce stade (adulte) que le tronc perd son caractère monopodiale. À un moment donné, le méristème du tronc meurt, il s'en suit des fourches successives à partir de relais de bourgeons latéraux à la fin des axes relais. Ce phénomène densifie la cime de l'arbre et lui donne un aspect de couronne bien arrondie. La figure 50 montre la séquence de développement (Figure 50a), ainsi que l'unité et le modèle architectural suivi par l'espèce *Khaya senegalensis* (Figure 50b). Le tableau 25 présente les catégories d'axe de l'unité architecturale chez *Khaya senegalensis*.

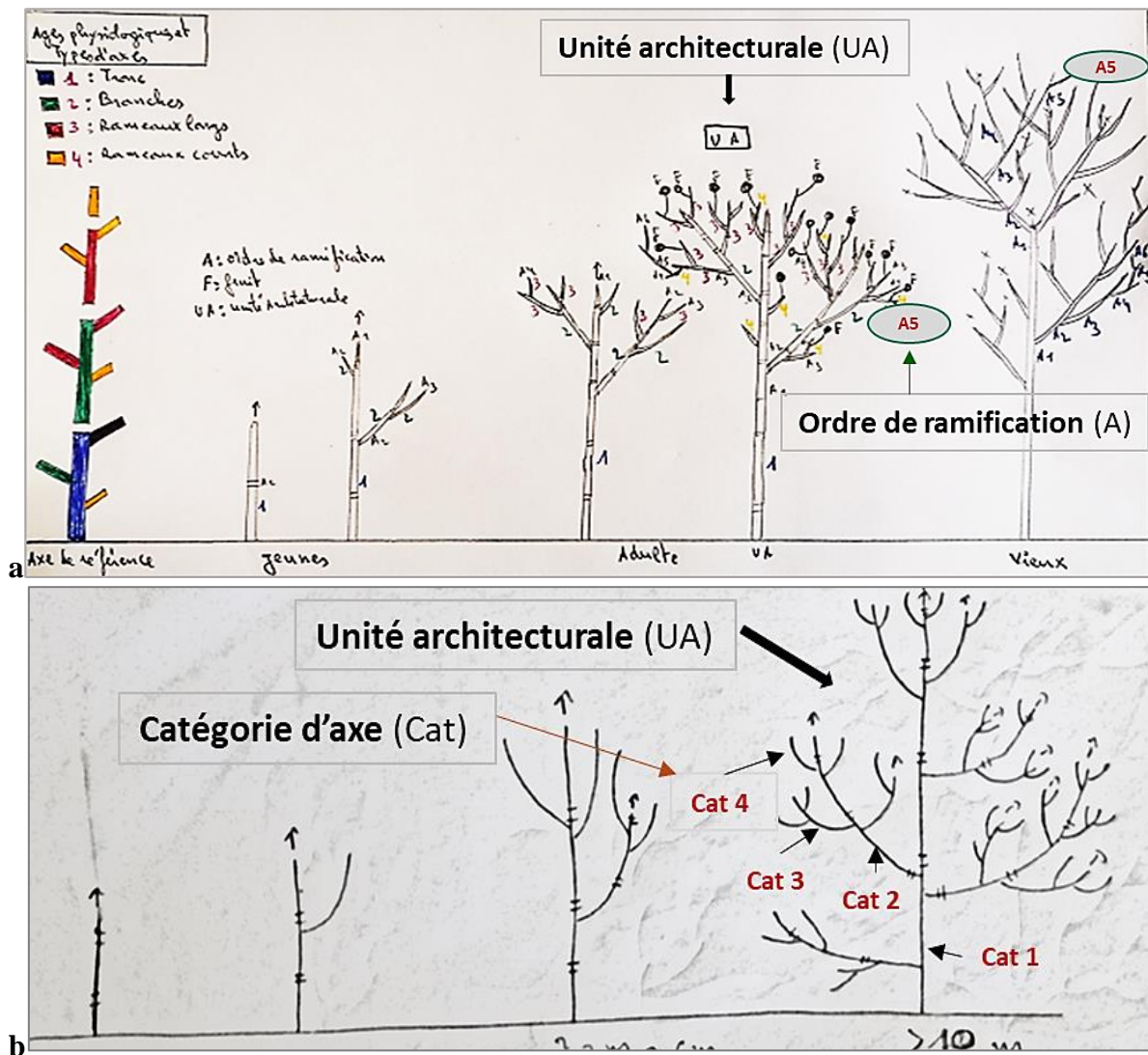


Figure 50 : représentation schématique de la séquence de développement, de l'unité architecturale et du modèle architectural chez *Khaya senegalensis*

a : séquence de développement du jeune au vieil arbre, **b** : modèle architectural de Rauh, UA : Unité architecturale, **F** : Fruit, **A** : Ordre de ramification

Tableau 25: description de la morphologie et des caractères architecturaux des catégorie d'axe chez *Khaya senegalensis*.

	Tronc ou Tige principale	Branches	Rameaux longs	Rameaux courts
Phyllotaxie	Alterne spiro-distique (Symétrie radiale)	Alterne spiro-distique (Symétrie axiale)	Alterne spiralée (minorité) à alterne distique en majorité (symétrie bilatérale)	Alterne spiro-distique (Symétrie radiale)
Type de feuilles NB : Sur les pousses jeunes adultes et vieux, plus la feuille se développe et s'allonge, plus la feuille composée imparipennée se différencie en feuille composée paripennée.	Pennerves simples entières et lancéolées (plantule et jeune feuille) à composées imparipennées (feuille adulte) et paripennées (vielle feuille).	Pennerves simples entières et lancéolées (partie proximale) à composées imparipennées puis paripennées (partie distale)	Composées paripennées	Pennerves simples entières et lancéolées (proximale) à composées imparipennées puis paripennées (distale)
Croissance	Indéterminée (indéfinie)	Indéterminée (indéfinie)	Déterminée à long terme (définie)	Déterminée à court terme (définie)
Direction préférentielle de croissance	Verticale	Verticale en apicale à oblique	Inclinée (oblique) à agéotrope	Verticale (majorité) à oblique (minorité)
Ramification	Acrotone (épitonie prononcées)	Acrotone (épitonie prononcées)	Non (plantule et jeune arbre) et Acrotone (Arbre adulte)	Non (absent sur l'échantillon observé)
Taille des unités de croissance (UC)	Variabilité : 7 à 56 cicatrices de feuilles ; Longues et courtes par endroit et selon les conditions écologique (5,15 à 67,8 cm)	Variabilité : 9 à 38 cicatrices de feuilles ; Longues et courtes par endroit et selon les conditions écologique 6 à 53 cm)	Variabilité : 9 à 27 feuilles ; Courts et très courts par endroit et selon les conditions écologique (environ 5 à 23 cm)	Variabilité : 7 à 15 feuilles ; Tous moyennement courts (2,4 à 7 cm)
Pousses annuelles	Polycyclique (2 à 6 UC)	Polycyclique (2 à 6 UC)	Polycyclique (2 à 5 UC)	Non observé
Sexualité	Pas de floraison	Pas de floraison	Floraison latérale	Floraison latérale
Caducité des feuilles	Non (feuilles non caduques même en saison sèche)	Non (persistantes même en saison sèche)	Non (persistantes même en saison sèche)	Non (persistantes même en saison sèche)
Conicité de l'axe	Hauteur : 0,54 m à 37m Diamètre : 3,3 cm à 276,8 cm	Hauteur : 0,62 m à 7 m Diamètre : 1,6 cm à 14 cm	Hauteur : 0,33 m à 0,7 m Diamètre : 1,1 cm à 5,2 cm	Hauteur : 0,07 m à 0,15 m Diamètre : 0,6 cm à 1,2 cm
Complexité de l'axe	Porte des ordres de ramification 2 et rameaux longs et courts	Porte des ordres de ramification 3, 4 et Rameaux court et courts	Porte des ordres de ramification 5 et rameaux courts	Non (absence de ramification)

Au cours du vieillissement (plus de 20 ans), les axes maîtresses s'affaissent sous le poids de la pesanteur, l'arbre fait des réitérations sur l'ensemble de ses axes (réitération partielle et totale) dans les zones courbées. Des bourgeons latents naissent et le système devient un

complexe réitéré. Les bourgeons terminaux meurent de plus en plus dans la partie distale des tiges feuillées dans la couronne de l'arbre. Cela crée des fourches successives ; les axes relais sont courts, rugueux et sont formés d'entrenœuds très courts. L'axe principale et les branches font des fourches alors que les rameaux longs et courts se développent par empilement de complexes réitérés. L'arbre unitaire au stade jeune et adulte prend la forme un arbre colonial (Figure 51).

La floraison reste latérale (Figure 51) et répartie généralement sur les rameaux courts à l'extrémité de la cime. La ramification devient épitone et amphitone. La phyllotaxie est alterne distique sur les dernières UC le long des axes maîtresses et pérennes ayant une direction horizontale, puis alterne spiro-distique sur les petits axes verticaux et oblique. La cime est allongée, hétérogène et ouverte. À ce stade l'architecture de l'arbre est complexe à décrire, il régresse au fil du temps à cause des réitérats totaux et partiels sur le tronc et les branches. La sénescence de l'arbre est fréquemment prononcée par un processus de dégénération de la couronne originelle (Figure 51). La figure 51 montre des dessins de schéma architectural (position de la sexualité et complexe réitéré d'un vieil arbre) chez *Khaya senegalensis*.

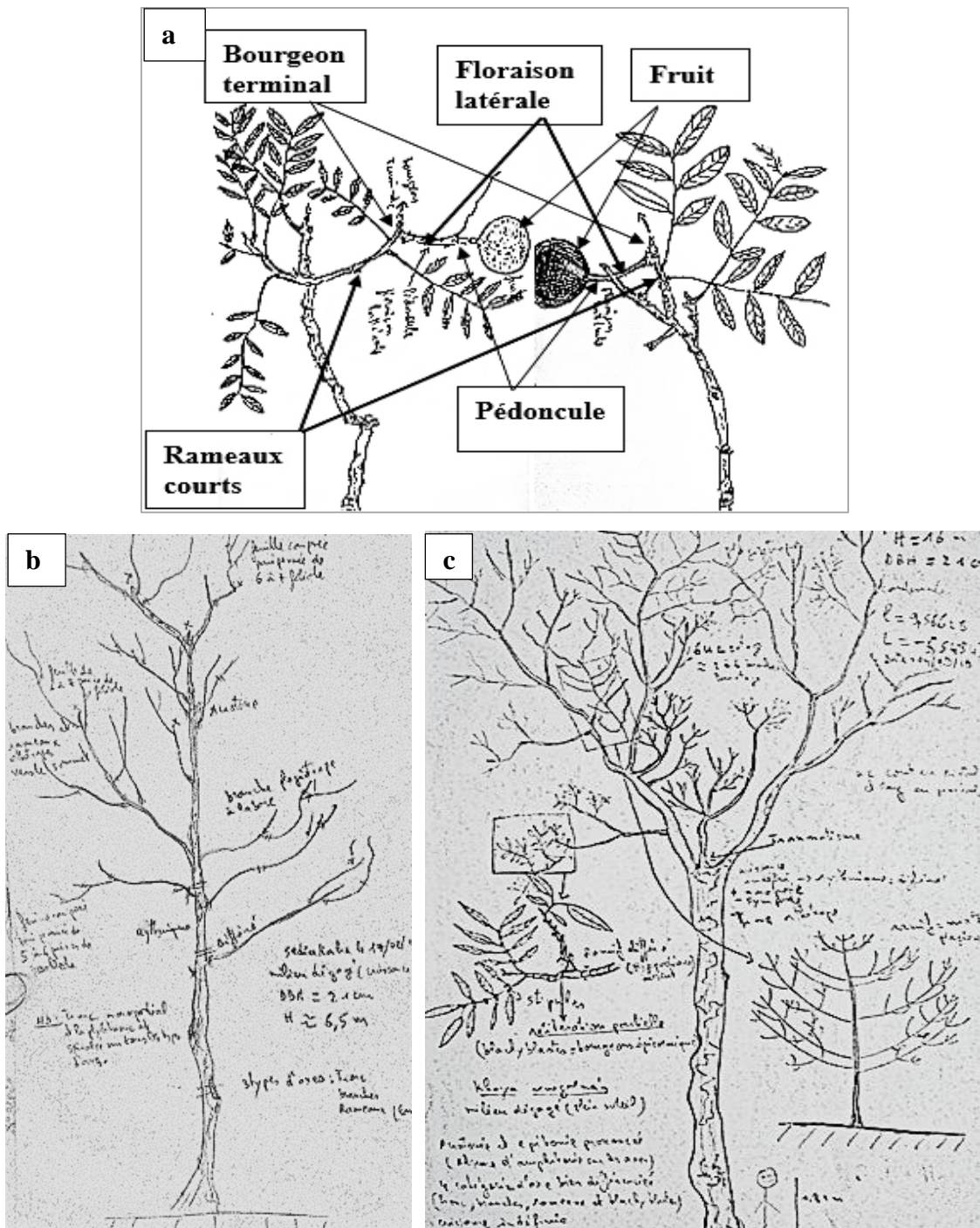


Figure 51: quelques dessins architecturaux chez *Khaya senegalensis*

a : Floraison latérale, b : arbre adulte, c : arbre sénescant (complexe réitéré)

7.2.3.2. Mise en place de l'unité architectural chez *Pterocarpus erinaceus*

Au stade jeune (0 à 5 ans), *Pterocarpus erinaceus* se présente comme un arbre à tige verticale (tronc orthotope et monopodiale avec une croissance indéfinie) dans des conditions optimales (pépinières). Dans des conditions contraignantes, l'arbre se présente sous forme de

buissons touffus avec plusieurs réitérations à partir du collet. Les réitérations sont obliques et horizontales sans direction fixe et préférentielle de croissance.

Les premières feuilles sont simples, entières et ovales avec 2 stipules par gaines foliaires. La phyllotaxie est alterne distique au début. Les feuilles se différencient en feuilles composées imparipennées, puis paripennées. En ce moment, la phyllotaxie devient alterne spiralée.

Dans de mauvaises conditions les unités de croissance sont facilement repérables (arrêt de croissance bien marqué). Cependant dans de bonnes conditions, les unités de croissance sont difficiles à observer. Pour les observer, il est nécessaire de faire un suivi de croissance ou d'avoir l'œil à repérer les zones de changements de couleur de l'écorce.

La ramification apparaît au bout de 2 ans de façon différée dans la partie médiane de l'UC (mésotonie) et souvent immédiate au sommet de l'UC (acrotonie et synchrone). Les branches sont plagiotropes et diffuses le long du tronc. La phyllotaxie est alterne spiralée sur le tronc et alterne distique sur les branches. Le tronc orthotrope s'affaisse plus tard dans sa partie supérieure sous l'effet de la pesanteur et du manque de lignine des nouvelles pousses du bourgeon apical. Après un traumatisme du bourgeon apical (mort d'apex), deux à trois bourgeons axillaires prennent le relai, il se forme une série de fourche. C'est le début de l'édification de la cime de l'arbre. L'architecture de l'arbre en ce moment est constituée de deux catégories d'axes que sont le tronc et les branches.

Au stade adulte (6 à 20 ans), l'architecture est constituée de trois catégories d'axes formant l'unité architecturale (tableau 26 ; Figure 52). Des pousses florifères monocycliques apparaissent en position latérale et terminale des bourgeons (Figure 52). La floraison a lieu entre la 10^{ième} et la 15^{ième} année. La ramification est différée et les branches sont plagiotropes ; tandis que les rameaux et ramilles sont amphitones et hypotones. Les ramifications dans la couronne de l'arbre, forment une structure en arceaux. La cime de l'arbre colonise et domine les espèces environnantes dans la majorité des cas (imposante dans son milieu). Tous les axes sont composés en ce moment d'une succession d'unité de croissance bien délimité par les arrêts de croissance. La floraison terminale et de la mort de l'apex des axes produisent des relais vigoureux donnant naissance à des fourches successives. Le phénomène de formation de fourche affecte également le tronc au fil du temps formant ainsi la cime de l'arbre adulte. L'arbre devient complexe en passant d'une structure hiérarchisée autour d'un axe principal (tronc unique) à une structure complexifiée (Figure 52). Dans la partie apicale de la cime, le

développement se poursuit par la mise en place de structure sympodiale tandis que les rameaux de la base de la cime s'affaissent et s'élaguent (Figure 52). La figure 52 montre la séquence de développement (Figure 52a), ainsi que l'unité et le modèle architectural suivi par l'espèce *Pterocarpus erinaceus* (Figure 52b). Le tableau 26 reprend de manière brève la morphologie de chaque type de catégorie d'axe, composant l'unité architecturale de *Pterocarpus erinaceus*.

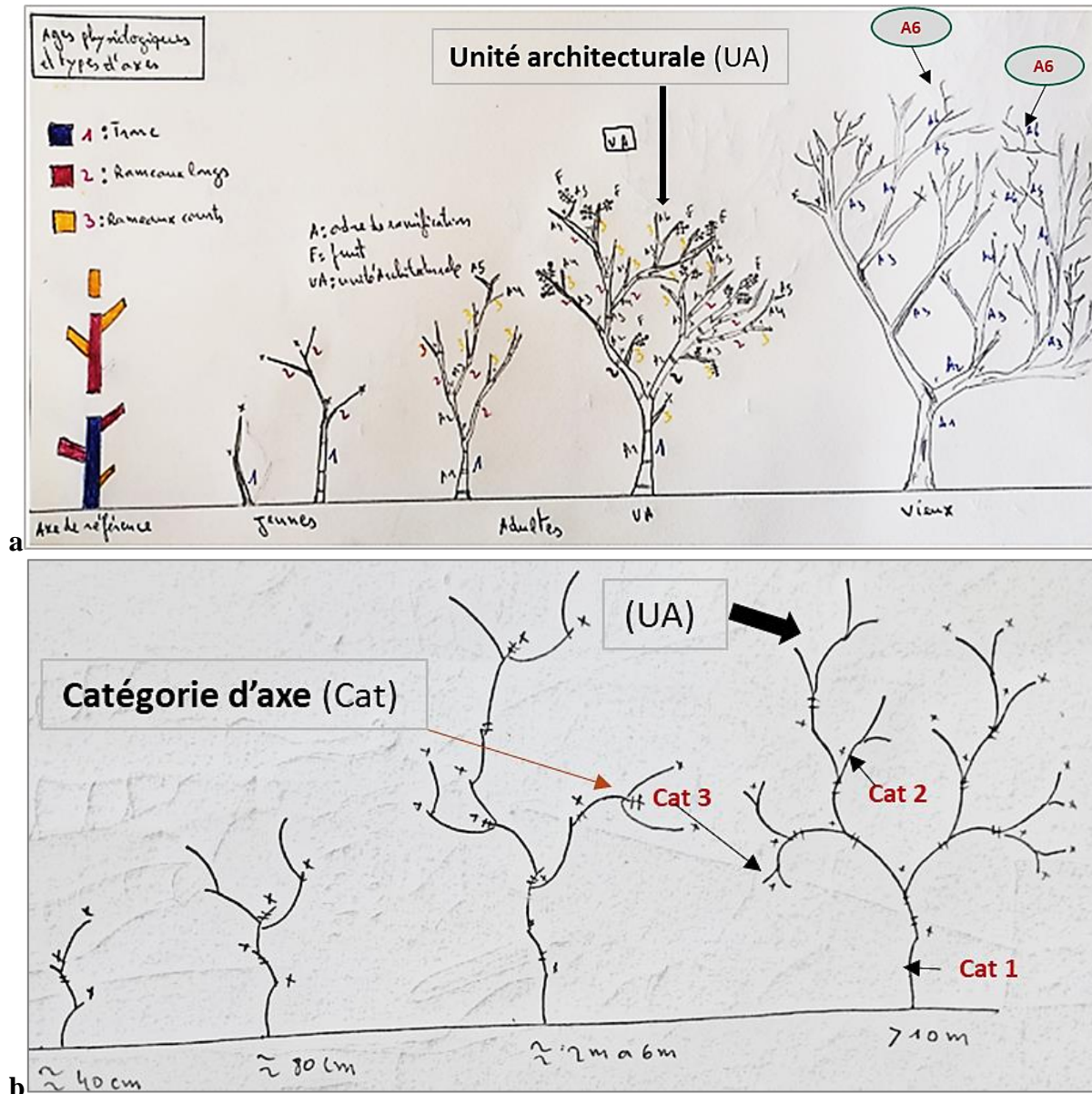


Figure 52 : représentation schématique de la séquence de développement, de l'unité architecturale et du modèle architectural chez *Pterocarpus erinaceus*

a : séquence de développement du jeune au vieil arbre, **b** : modèle architectural de Troll, UA : Unité architecturale, F : Fruit, A : Ordre de ramification

Tableau 26: description morphologique des catégories d'axe chez *Pterocarpus erinaceus*.

	Tronc ou Tige principale	Rameaux	Rameaux courts
Phyllotaxie	Alterne spiralée (Symétrie radiale)	Alterne distique (majorité) et spiralées (minorité) : Symétrie bilatérale en majorité et axiale en minorité	Alterne distique (Symétrie bilatérale)
Type de feuilles	Pennerves simples entières et ovales avec 2 stipules par gaines chez la jeune plantule à composées imparipennées (feuille jeune) avec 2 stipules par gaine à paripennées (feuille mature et vieille) chez les arbres.	Composées imparipennées (jeune feuille) avec 2 stipules par gaine à composées paripennées (feuille mature et vieille).	Composées imparipennées (jeune feuille) avec 2 stipules par gaine à composées paripennées (feuille mature et vieille).
Croissance	Indéterminée (Indéfinie)	Déterminée à très long terme (Définie)	Déterminée à court terme (Définie)
Direction préférentielle de croissance	Verticale	Horizontale et oblique (majorité) puis oblique (minorité)	Horizontale
Ramification	Acrotone en apicale et mésotone (médiane) sur les UC	Epitonie et amphotone sur les UC	Non
Taille des unités de croissance (UC)	Variable : 4,5 à 40 cicatrices de feuilles ; Longues et courtes par endroit (3,55 à 62,4 cm)	Variabilité : 3 à 39 cicatrices de feuilles ; Longues et courtes par endroit (2,4 à 41,6 cm)	Variabilité : 3 à 26 feuilles ; Courts et très courts par endroit (2,3 à 13,4 cm)
Pousses annuelles	Polycyclique (2 à 4 UC)	Polycyclique (2 à 4 UC)	Non observée
Sexualité	Ne porte pas de sexualité	Ne porte pas de sexualité	Terminale et latérale en saison sèche
Caducité des feuilles	Période de saison sèche de de floraison (janvier, février et mars)	Période de saison sèche de de floraison (janvier, février et mars)	Période de saison sèche de de floraison (janvier, février et mars)
Conicité de l'axe	Hauteur : 0,5 m à 28 m Diamètre : 1,1 cm à 71,4 cm	Hauteur : 0.15 m à 7,6 m Diamètre : 0,7 cm à 38,1 cm	Hauteur : 0.04 m à 0,13 m Diamètre : 0,4 cm à 1,31 cm
Complexité de l'axe	Porte que des ordres de ramification 2 et 3	Porte des ordres de ramification 3, 4 et rameaux courts	Non (absence de ramification), mais porte des grappes et pousses florifères

Au stade vieux (plus de 20 ans), l'arbre comprend 5 à 6 ordres de ramification mais garde toujours les trois catégories d'axes décrites ci-dessus. La floraison terminale et latérale (Figure 53) envahit tous les axes situés à l'extrémité de la cime de l'arbre. Le phénomène de formation de fourche est de plus en plus prononcé. La floraison apparaît que sur les A4 (minorité), A5 et rameaux court (majorité). Avec un contour irrégulier, la cime de l'arbre est ouverte dans sa base, tandis que son sommet est envahi par des rameaux sympodiaux en arceaux successifs (empilements).

Au fil du temps les structures en arceaux meurent, s'élaguent et sont remplacés par moins d'axe relais qu'au stade jeune et adulte. Ces axes relais sont en majorité hypotones et portent la sexualité en période de floraison. Les pousses florifères demeurent monocycliques au cours du vieillissement de l'arbre. Plus tard les branches maîtresses de la cime s'affaissent. Les bourgeons dormants des zones de courbures développent des complexes réitérés totaux épitones. Tous ces complexes réitérés s'affaissent au cours du développement ultérieur de l'arbre. De nouveaux complexes sont générés une fois de plus dans leur zone de courbure, ainsi de suite. La structure du vieil arbre devient donc un empilement de complexes réitérés.

La figure 53 montre le type de floraison ainsi que quelques dessins architecturaux relative à la réitération totale de tige après la mort d'un bourgeon terminal, aux feuilles cotylédonnaires, au développement architectural selon le modèle de Troll au stade adulte et au phénomène de fourchaison dans la cime de l'arbre au stade vieux chez *Pterocarpus erinaceus*.

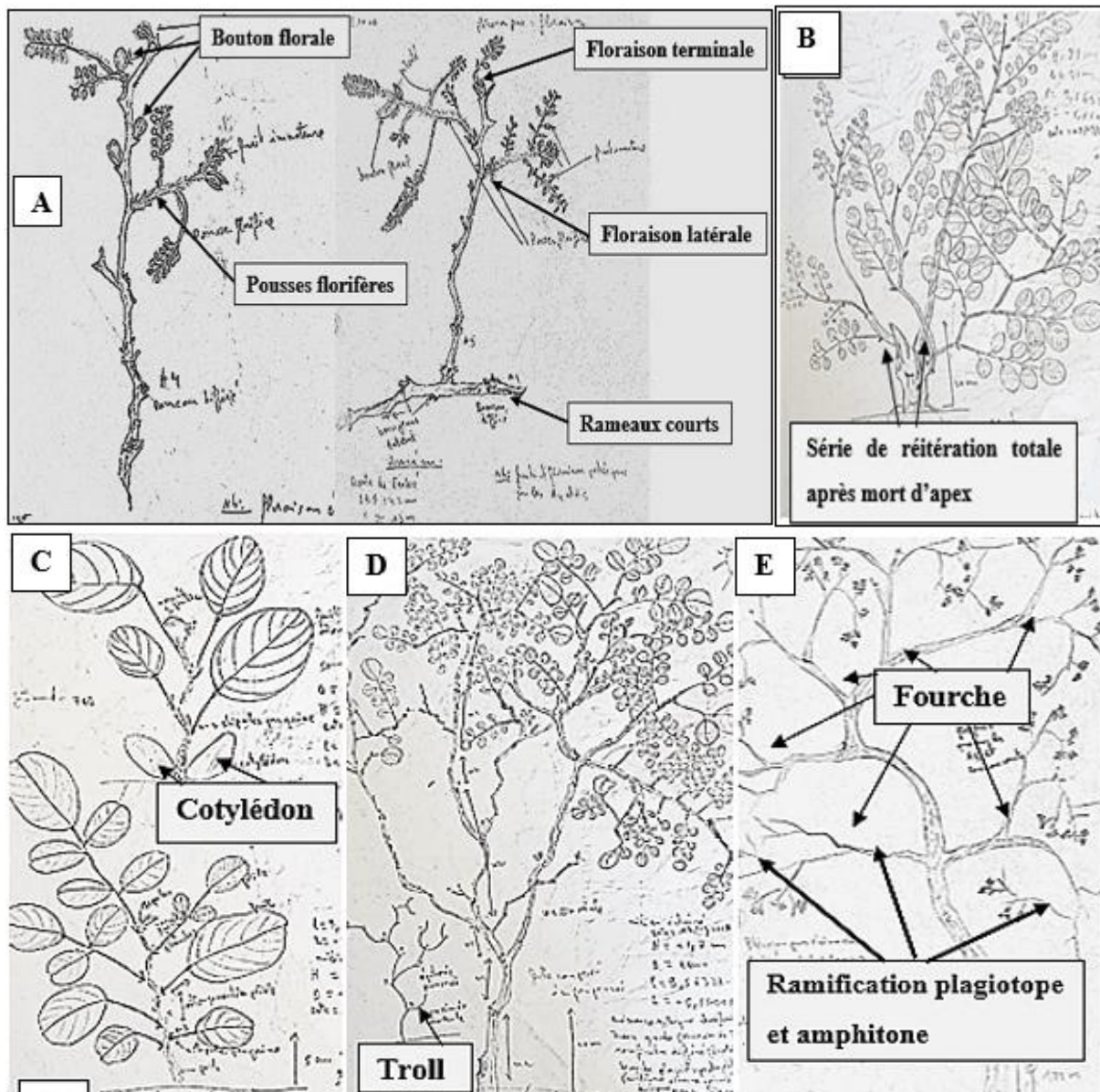


Figure 53: dessins architecturaux chez *Pterocarpus erinaceus*

A : floraison latérale et terminale, B : réitération (gourmants) après mort d’apex, C : stade plantule, D : satde adulte et E : phénomène de fourchaison au stade vieux

7.2.3.3. Mise en place de l’unité architecturale chez *Parkia biglobosa*

Au stade jeune chez *Parkia biglobosa*, la tige est non ramifiée au début. Les feuilles sont composées bipennées avec une phyllotaxie alterne spiro-distique. La feuille porte 2 à 6 paires de folioles avec une stipule à la base du pétiole (gaine foliaire) et une autre stipule à la fin du rachis primaire. Chaque foliole porte 9 à 16 paires de folioles secondaires (foliolules) et les rachis secondaires portent une seule stipule secondaire insérée au bout du rachis secondaire.

Le méristème apical meurt par dessèchement chaque 3 à 4 mois ; la partie en dessous se gonfle par renflement donnant une forme de château d’eau au module précédent. À ce moment,

le mode de croissance initialement monopodial devient sympodial. Le bourgeon axillaire le plus proche prend le relais dans le sens d'évolution de la tige principale. Il meurt à chaque construction de 2 à 6 phytomères, ainsi de suite. Ce système forme des modules bien visibles le long de la tige. Dans la majorité des cas, il n'y qu'une seule pousse relai et la structure est un sympode monochasial (Figure 54). La tige est le plus souvent courbée dans sa partie distale et se redresse plus tard lorsque la tige prend du volume et perd ses feuilles. Au fur et à mesure que la tige évolue en hauteur, les feuilles anciennes (dans la base de la tige) s'élaguent seules de façon successive. La tige ne conserve que les feuilles nouvelles du module formé nouvellement dans la partie apicale. Ces feuilles sont souvent lourdes que les autres entités. Cette forte masse engendre un affaissement de la tige. Le bourgeon relai se met en place dans la partie de courbure de la tige, le reste de la portion courbée s'élague et ainsi de suite. La tige est un pseudomonopode et les modules sont bien visibles sur la tige (les zones d'arrêt de croissance marquées par des zones bien gonflées en forme de plateau).

La ramification apparaît dans la deuxième année (2 ans), les branches sont courtes, différées et situées dans le milieu de l'arbre. La ramification est au début dans une direction verticale et s'affaisse, puis s'allonge dans une direction horizontale. Elle se forme dans la partie médiane des modules en majorité (mésotone) et souvent en fin des modules (acrotone). La ramification n'est pas continue, elle ne suit aucun rythme de croissance, elle est diffuse sur le tronc. Toutes les branches formées suivent le même processus d'élagage du tronc et sont toutes des sympodes. C'est le début de l'établissement de la cime chez *Parkia biglobosa* (Figure 54).

Au stade adulte, l'arbre met en place des rameaux de plus en plus vigoureux dont la structure se présente comme une succession d'axes relai amphitones et hypotones. L'unité architecturale se met en place à ce stade avec 3 catégories d'axes (tableau 27 ; Figure 54) et 4 ordres de ramifications. Les premières floraisons ont lieu entre la 10^{ième} et la 16^{ième} année après plantation. La floraison est terminale et latérale (Figure 51) chez cette espèce et intervient en saison sèche. Les boutons floraux s'allongent et envahissent tout l'arbre. La floraison a lieu que sur les A4 (majorité) et A5 (minorité). À ce stade encore, l'arbre possède une structure hiérarchisée autour d'un gros tronc unique (Figure 54). L'inflorescence terminale des axes et du tronc conduit plus tard à produire des fourches (relais vigoureux) successives ; dont l'une des fourches s'établit dans le prolongement du tronc (vertical) jusqu'à un certain moment. Cette direction devient ensuite oblique, puis horizontale sous l'effet de la pesanteur. Lorsque l'arbre atteint son développement maximal, le contour de la cime est arrondi et irrégulier ; la périphérie de la cime est composée de structures sympodiales de dimension et morphologie

presque identique. La figure 54 montre la séquence de développement (Figure 54a), ainsi que l'unité et le modèle architectural suivi par l'espèce *Parkia biglobosa* (Figure 54b). Le tableau 28 présente la description morphologique et architecturale des types d'axes constituant l'unité architecturale chez *Parkia biglobosa*.

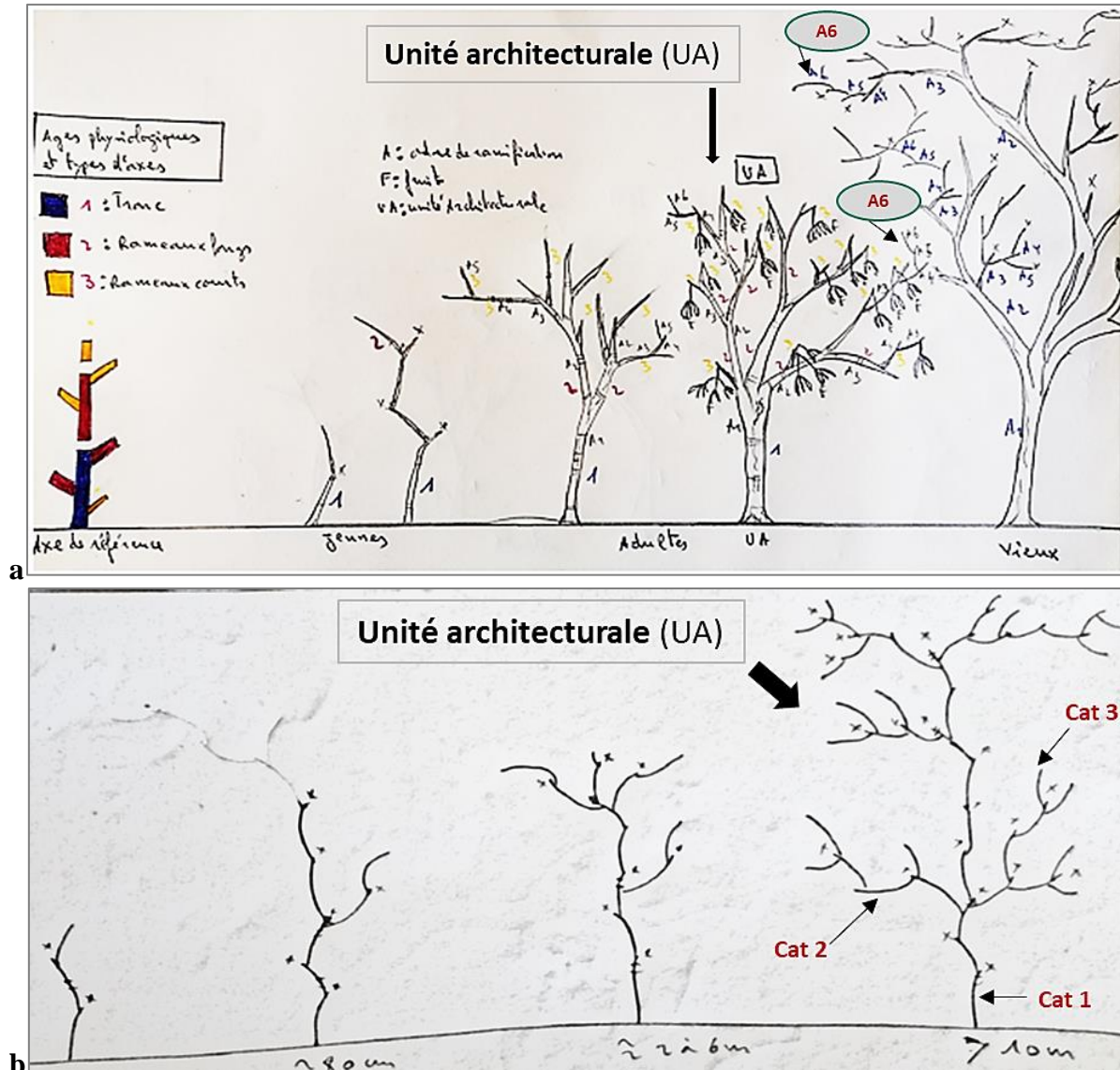


Figure 54 : représentation schématique de la séquence de développement, de l'unité architecturale et du modèle architectural chez *Parkia biglobosa*

a : séquence de développement du jeune au vieil arbre, **b** : modèle architectural de Champagnat, **UA** : Unité architecturale, **F** : Fruit, **A** : Ordre de ramification

Tableau 27 : description morphologique des catégories d'axes chez *Parkia biglobosa*.

	Tronc ou Tige principale	Rameaux	Rameaux courts
Phyllotaxie	Alterne spiralées à distiques (Symétrie axiale et bilatérale)	Alterne spiralées à distiques avec torsion de l'axe feuillé donnant un aspect de feuilles spiralées (Symétrie axiale et bilatérale)	Alterne spiralées à distiques avec torsion du module donnant un aspect de feuilles spiralées (Symétrie axiale et bilatérale)
Type de feuilles NB : En milieu sauvage, Des nodosités (renflement) sont fréquent sur le pétiole et le rachis des feuilles	Composées paripennées présentant une stipule par gaine de feuilles et une autre stipule à la fin du rachis primaire. Les feuilles sont composées de 2 à 16 paires de folioles sur la feuille composées et de 11 à 52 paires de foliollules sur chaque foliole.	Composées paripennées présentant une stipule par gaine de feuilles et une autre stipule à la fin du rachis primaire. Les feuilles sont composées de 2 à 16 paires de folioles sur la feuille composées et de 11 à 52 paires de foliollules sur chaque foliole.	Composées paripennées présentant une stipule par gaine de feuilles et une autre stipule à la fin du rachis primaire. Les feuilles sont composées de 2 à 16 paires de folioles sur la feuille composées et de 11 à 52 paires de foliollules sur chaque foliole.
Croissance	Déterminée (définie)	Déterminée (définie)	Déterminée (définie)
Direction préférentielle de croissance	Verticale dans la partie proximale et oblique à horizontale dans sa partie distale	Oblique (minorité) et horizontale (majorité)	Horizontale
Ramification	Mésotone (majorité) et acrotone (minorité) sur les modules de croissance	Mésotone (majorité) et acrotone (minorité) sur les modules de croissance	Non
Taille des unités de croissance (UC)	Variable : 4,5 à 35,5 cicatrices de feuilles ; Longues et courtes par endroit (3,85 à 51,4 cm)	Variabilité : 4 à 27 cicatrices de feuilles ; Longues et courtes par endroit (4,5 à 43,6 cm)	Variabilité : 3 à 16 feuilles ; Courts et très courts par endroit (2,1 à 11 cm)
Pousses annuelles	Polycyclique (2 à 5 UC)	Polycyclique (2 à 4 UC)	Polycyclique (2 à 3 UC)
Sexualité	Terminale et latérale en saison sèche	Terminale et latérale en saison sèche	Terminale et latérale en saison sèche
Caducité des feuilles	Période de saison sèche de de floraison (janvier, février et mars)	Période de saison sèche de de floraison (janvier, février et mars)	Période de saison sèche de de floraison (janvier, février et mars)
Conicité de l'axe	Hauteur : 0,64 m à 31,7 m Diamètre : 2,8 cm à 178,44 cm	Hauteur : 0,26 m à 9,5 m Diamètre : 1.4 cm à 23,2 cm	Hauteur : 0,08 m à 0,67 m Diamètre : 0,7 cm à 4,4 cm
Complexité de l'axe	Porte des ordres de ramification 2, 3 et des rameaux courts et gourmands	Porte que des ordres de ramification 3 et des rameaux courts gourmands	Non (absence de ramification), mais porte des grappes et pousses florifères

Chez les arbres vieux, tous les rameaux ont tendance à s'affaisser. De nouveaux rameaux sympodiaux se développent à partir de bourgeons dormants par empilement dans les zones de courbure en position amphitone et epitone. Ces structures sont en fait des réitérations partielles successives. Les réitérations totales se produisent plus tard et donnent l'impression de secourir l'arbres en détresse. Ces réitérations nouvelles régénèrent la cime de l'arbre, alors que les anciennes structures tombent de l'arbre (l'arbre fait sa mue).

L'arbre entier devient un complexe réitéré ; dans la périphérie de la cime, les structures sympodiales forment des arceaux successifs (empilement). À ce stade l'arbre peut porter jusqu'à 6 ordres de ramification avec toujours trois types de catégories d'axes. Pendant la floraison, les réitérations portent également des inflorescences terminales et latérales. La floraison envahit tout l'arbre à ce moment ; le contour de la cime est arrondi mais irrégulier. La figure 55 présente des dessins du type de floraison chez *Parkia biglobosa*.

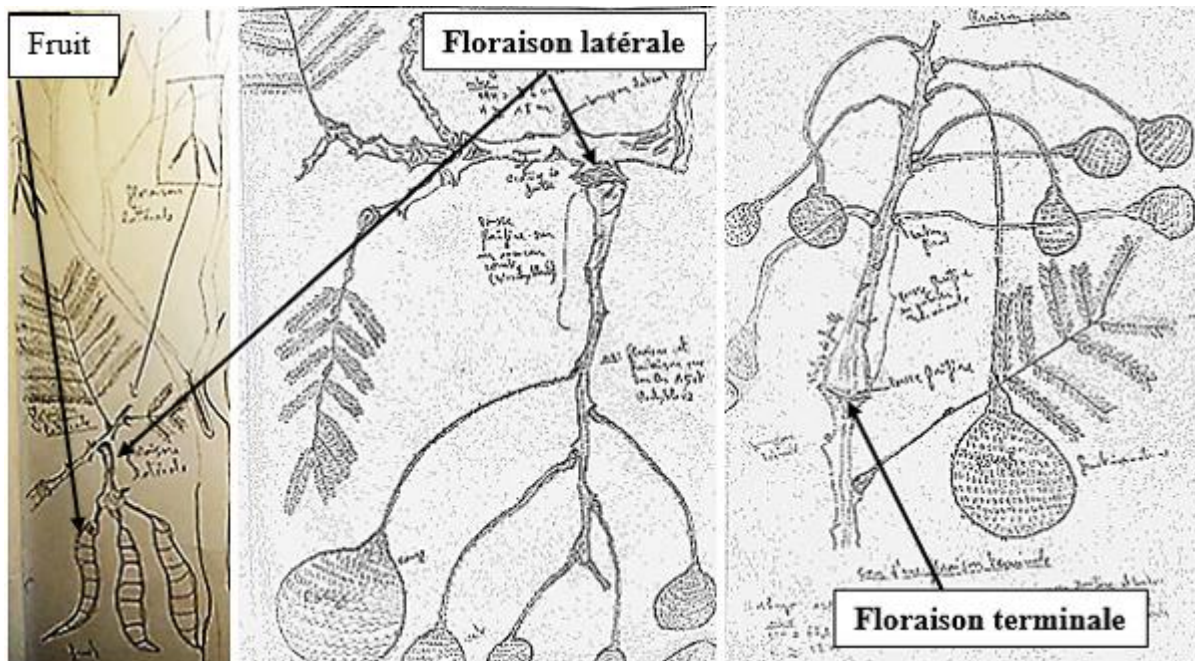


Figure 55 : dessins de types de floraisons chez *Parkia biglobosa*

7.2.3.4. Caractéristiques architecturales chez les espèces cibles

Khaya senegalensis est un arbre qui se développe selon le modèle architectural de Rauh (tronc et branche orthotrope, ramification monopodiale, croissance rythmique et continue, sexualité latérale). Sa structure se met en place en trois phases que sont, l'initiation du développement et de la cime, mise en place de l'unité architecturale et des processus de réitération partielle et totale (duplication de son architecture). Le niveau d'organisation est 5.

Ce sont, le phytomère, l'unité de croissance, l'axe, l'unité architecturale et l'arbre entier (complexe réitéré). Le tableau 28 donne un récapitulatif des différents caractères architecturaux chez *Khaya senegalensis*.

Tableau 28 : caractères architecturaux propre à l'espèce *Khaya senegalensis*.

<p>1. Mode de croissance</p> <ul style="list-style-type: none"> -Indéfinie -Rythmique -Monopodiale (pseudomonopode dû à certains traumatismes : attaque d'insecte) -Pré et néoformation des organes 	<p>2. Mode de ramification</p> <ul style="list-style-type: none"> -Différée (absence d'hypopodium et arrêts de croissance bien marqués à la fin des UC) -Latérale -Terminale de l'UC : acrotone -Rythmique (avec des étages de branches) -Bourgeons surnuméraires au même nœud
<p>3. Différenciation des axes</p> <ul style="list-style-type: none"> -Orthotrope dans la partie apicale (distale) -Mixte dans la partie médiane (agéotrope) -Plagiotrope dans la partie basale (proximale) 	<p>4. Position de la sexualité</p> <ul style="list-style-type: none"> -Latérale

Pterocarpus erinaceus se développe comme le modèle architectural de Troll (plante à axe mixte plagiotrope dans la partie proximale et distale, le tronc s'édifie par superposition d'axes relais affaissés « empilements » qui se redressent progressivement, ramification sympodiale, croissance définit, sexualité mixte). Sa structure se met en place en trois phases : initiation du développement et de la cime, mise en place de l'unité architecturale et complexe réitéré. Le niveau d'organisation est 5. Ce sont, le phytomère, l'unité de croissance, l'axe, l'unité architecturale et l'arbre entier. Le tableau 29 présente les principaux caractères architecturaux chez *Pterocarpus erinaceus*.

Tableau 29 : caractères architecturaux propre à l'espèce *Pterocapus erinaceus*

1. Mode de croissance	2. Mode de ramification
<ul style="list-style-type: none"> -Indéfinie (Tronc des jeunes arbres en pépinière) et définie (rameaux moyens et courts sur les arbres sauvages) -Colonaire, rythmique -Sympodiale monochasiale, dichasiale et très souvent polychasiale (pseudomonopode pour les arbres sauvages jeune et monopode pour les arbres jeunes en pépinière) -Préformation des organes 	<ul style="list-style-type: none"> -Terminale (rarement latérale : mésotone) -Rythmique -Différée ou proleptique (absence d'hyopodium)
3. Différenciation des axes	4. Position de la sexualité
<ul style="list-style-type: none"> -Duplication de l'axe principal (fourche) -Axe sympode (pseudomonopode) -La majorité des axes (A2 et A3) sont plagiotropes amphitones et agéotropes 	<ul style="list-style-type: none"> -Terminale et latérale (généralement synchronisée)

Chez l'espèce *Parkia biglobosa*, l'arbre est identique au modèle de Champagnat au stade jeune arbre (plante à axe végétatif mixte, la tige principale est orthotrope dans sa partie proximale et plagiotrope « s'affaisse » dans sa partie distale). L'arbre transite ensuite vers le modèle de Troll aux stades adulte et vieux (plante à axe plagiotrope dans la partie proximale et distale, le tronc s'édifie par superposition d'axes relais affaissés qui se redressent progressivement, ramification sympodiale, amphitone et epitone, croissance définit, sexualité terminale et latérale). Sa structure se met en place en trois phases : initiation du développement et mise en place de la cime, ensuite l'établissement de l'unité architecturale et enfin la duplication de l'architecture par une série de réitérations partielles et totales. Le niveau d'organisation est 5. Ce sont, le phytomère, le module ou l'unité de croissance, l'axe, l'unité architecturale et le complexe réitéré. Le tableau 30 présente les principaux caractères architecturaux chez *Parkia biglobosa*.

Tableau 30 : caractères architecturaux propre à l'espèce *Parkia biglobosa*.

<p>1. Mode de croissance</p> <ul style="list-style-type: none"> -Définie -Colonaire, rythmique -Sympodiale (mono, di et polychasiale et modulée) -Préformation d'organes 	<p>2. Mode de ramification</p> <ul style="list-style-type: none"> -Terminale et médiane (acrotonie et mésotonie sur les modules) -Rythmique -Différée ou proleptique (sans hypopodium, le méristème terminal meurt, le ou les bourgeons relais sont retardés)
<p>3. Différenciation des axes</p> <ul style="list-style-type: none"> -Ralentissement rapide de l'activité méristématique et mort du bourgeon terminal à court terme - Tronc semblable à un orthotrope (pseudomonopode) -La majorité des axes (rameaux) sont Plagiotropes et agéotropes 	<p>4. Position de la sexualité</p> <ul style="list-style-type: none"> - Terminale et latérale (synchronisée)

7.3. Modélisation structurelle et fonctionnelle des espèces cibles

7.3.1. Calibration du modèle de fonctionnement méristématique et du développement des espèces cibles

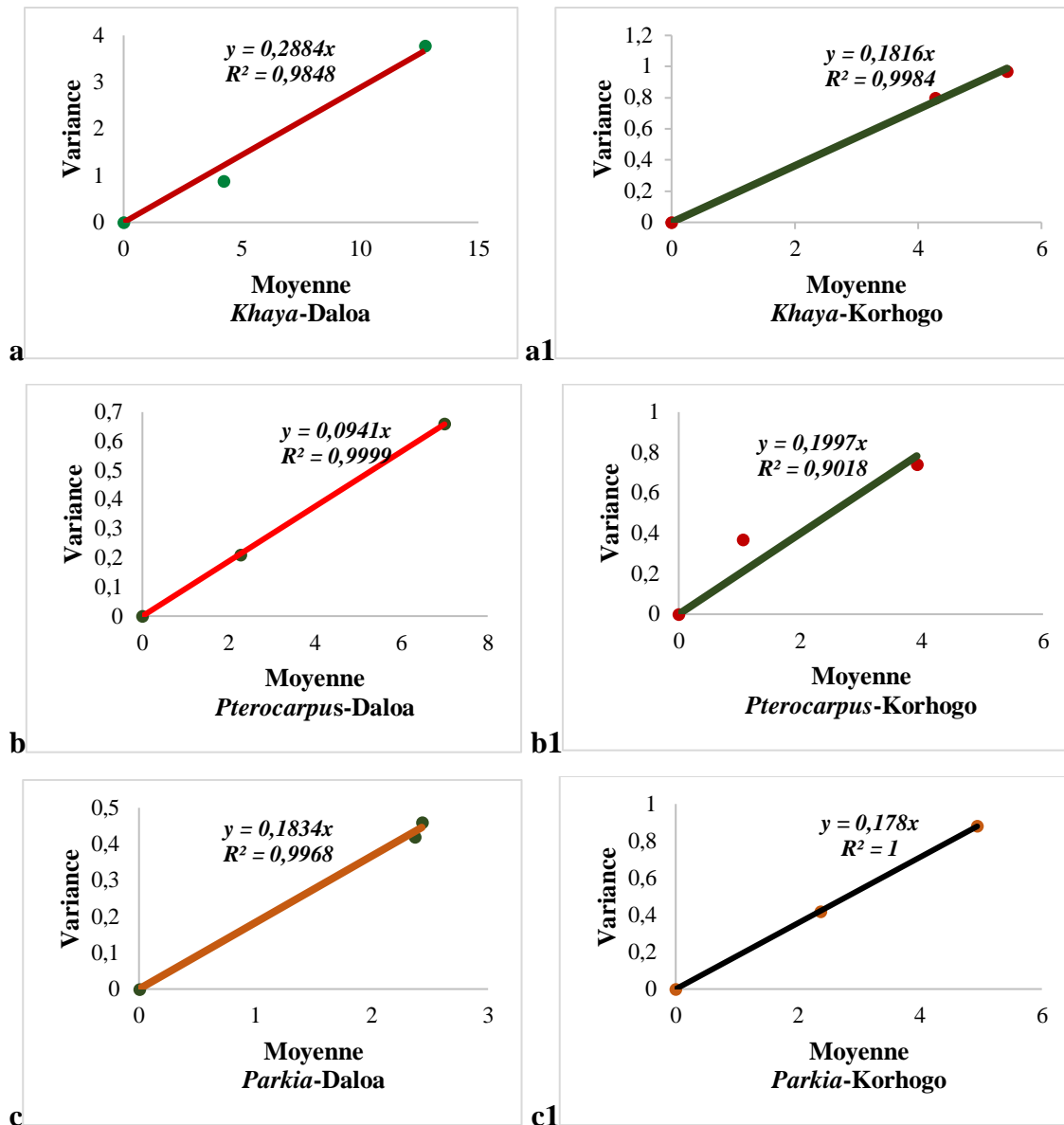
La moyenne et la variance du nombre de phytomère par tige à 6 mois, la moyenne et la variance du nombre d'UC par tige à 12 et 24 mois, ainsi que la moyenne et la variance du nombre d'UC par branche à 24 mois sont donné par le tableau 31 par espèces et par station. Chez *Khaya senegalensis*, les probabilités d'émission d'entités botanique (phytomères et UCs) par les méristèmes des tiges sont plus grandes à Korhogo qu'à Daloa. Contrairement aux branches. Chez *Pterocarpus erinaceus*, cette probabilité est grande à Daloa qu'à Korhogo quelque soit l'âge physiologique (tiges et branches). Chez *Parkia biglobosa*, les valeurs processus de Bernouilli sont presque similaire à 12 et 24 mois. Contrairement à 6 mois, où cette probabilité est grande à Korhogo qu'à Daloa (Tableau 31).

Tableau 31: tableau récapitulatif de la Moyenne, la Variance et les paramètres du processus de Bernoulli des tiges principales à 6, 12 et 24 mois puis des branches à 24 mois par localité et par espèce.

Espèces	Localités	Variables	Tiges 6 mois	Tiges 12 mois	Tiges 24 mois	Branches 24 mois
<i>Khaya senegalensis</i>	Daloa	M	18,14	4,22	12,73	1,6
		V	6,28	0,89	3,78	0,49
		P	0,65	0,79	0,71	0,69
	Korhogo	M	15,23	4,28	5,44	1,75
		V	4,67	0,8	0,97	0,79
		P	0,71	0,81	0,82	0,55
<i>Pterocarpus erinaceus</i>	Daloa	M	8,9	2,28	7	1,6
		V	3,06	0,21	0,66	0,49
		P	0,66	0,91	0,91	0,69
	Korhogo	M	8,5	1,06	3,92	1,75
		V	3,39	0,37	0,74	0,79
		P	0,6	0,65	0,81	0,55
<i>Parkia biglobosa</i>	Daloa	M	10,5	2,43	2,37	1,22
		V	4,04	0,46	0,42	0,19
		P	0,61	0,81	0,82	0,84
	Korhogo	M	8,72	2,37	4,94	1,28
		V	2,35	0,42	0,88	0,24
		P	0,73	0,82	0,82	0,81

M : moyenne, V : variance et P : Bernouilli.

La figure 56 montre que les valeurs du processus de Bernoulli (P) à 12 et 24 mois sont proches. Ceci indique un développement stabilisé chez les trois espèces quel que soit la station (Figure 56). Chez *Khaya senegalensis*, la variance et la moyenne sont linéairement corrélées par : $V=0,29*M$ (Figure 56a), ce qui donne comme probabilité $P=0,71$ avec $P=1-0,29$ à Daloa. A Korhogo, la variance et la moyenne sont linéairement corrélées par : $V=0,18*M$, (Figure 56a1) cela donne un Bernouilli $P=0,82$ avec $P=1-0,18$. Chez *Pterocarpus erinaceus* la variance et la moyenne sont linéairement liées par $V=0,09*M$, ce qui donne $P=0,91$ à Daloa et $V=0,2*M$ avec $P=0,81$ à Korhogo (Figure 56b et b1). Chez *Parkia biglobosa* la variance et la moyenne sont linéairement liées par $V=0,18*M$ avec $P=0,82$ à Daloa et $V=0,18*M$ avec $P=0,82$ à Korhogo (Figure 56c et c1).



Stabilité du processus de Bernoulli dans le temps

Figure 56 : relation linéaire entre la moyenne et la variance du nombre d'UC par tige sur deux stades de développements

Chez *Khaya senegalensis* à Daloa (a) et Korhogo (a1), chez *Pterocarpus erinaceus* à Daloa (b) et Korhogo (b1) et chez *Parkia biglobosa* à Daloa (c) et Korhogo (c1)

La distribution du nombre de phytomère par UC montre que les UC ont statistiquement des tailles différentes d'un rang à un autre ($P < 0,05$) chez les trois espèces et dans chaque station, sauf chez l'espèce *Pterocarpus erinaceus* à Daloa ($P > 0,05$) (Tableau 32). Chez *Khaya senegalensis*, les individus ont jusqu'à 15 UCs à Daloa contre jusqu'à 7 UCs à Korhogo le long des tiges. Chez *Pterocarpus erinaceus*, les individus ont jusqu'à 11 UCs à Daloa contre jusqu'à 8 UCs à Korhogo le long des tiges. Chez *Parkia biglobosa*, les individus ont jusqu'à 10 UCs à Daloa contre jusqu'à 6 UCs à Korhogo le long des tiges. Le processus de Bernoulli combiné

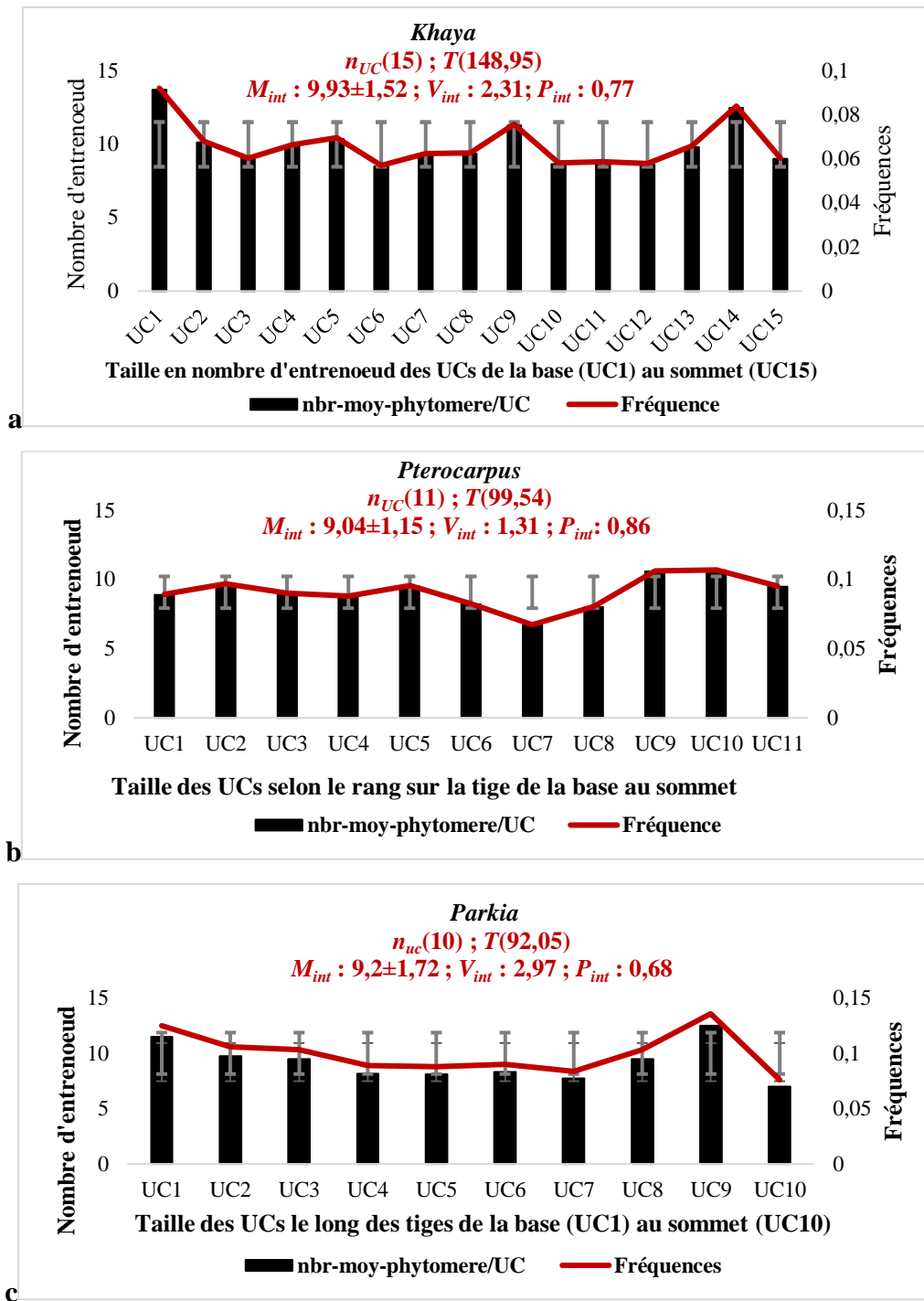
aux effets environnementaux à chaque cycle de croissance (UC par UC) génère des UCs de tailles variables selon le rang. Les premières UCs (à la base de la tige) et des dernières UCs (au sommet de la tige) sont généralement plus grande que les UCs situées dans les parties médianes des tiges. Le tableau 32 montre que quelque soit l'espèce, la station de Daloa produit des individus de grande taille en nombre d'UC que ceux de la station de Korhogo.

Tableau 32 : comparaison du nombre de phytomère par rang d'UC des tiges et branches sur un échantillons de 30 individus de 24 mois chez les espèces cibles par station

Rang UC	<i>Khaya-Daloa</i>	<i>Khaya-Korhogo</i>	<i>Pterocarpus-Daloa</i>	<i>Pterocarpus-Korhogo</i>	<i>Parkia-Daloa</i>	<i>Parkia-Korhogo</i>
Base-UC1	13,03±4,68 ab	10,12±3,61 ab	8,96±3,09 a	9±4,46 a	10,7±3,86 ab	10,87±3,99 a
UC2	9,56±4,18 ab	7,7±4,16 b	8,36±3,26 a	6,53±2,77 ab	8,66±3,58 b	7,17±3,93 ab
UC3	8,58±3,19 b	7,33±4,17 b	9,03±3,41 a	6,26±3,01 ab	8,46±4,38 b	6,56±2,54 ab
UC4	9,5±5,11 ab	7,6±4,54 b	8±2,84 a	5,5±1,84 ab	7,96±2,9 b	7,13±3,06 ab
UC5	9,1±3,51 ab	6,18±2,04 b	8,42±4,55 a	5±1,71 ab	7,27±2,43 b	7,15±4,51 ab
UC6	8,26±2,66 b	16±0 a	6,88±2,65 a	4±0 b	8,27±2,43 b	9,25±5,21 ab
UC7	9,07±3,75 ab	10±0 ab	6,65±2,46 a	3±0 b	7,71±4,6 b	-
UC8	9,8±3,12 ab	-	7,46±2,53 a	9±0 a	8,66±2,88 b	-
UC9	10,16±4,15 ab	-	10,28±2,42 a	-	14±0 a	-
UC10	7,89±3,14 b	-	10,66±2,52 a	-	7±0 b	-
UC11	8,52±3,01 b	-	10±0 a	-	-	-
UC12	8,55±2,7 b	-	-	-	-	-
UC13	10,5±5,91 ab	-	-	-	-	-
UC14	14±5,19 a	-	-	-	-	-
Apex-UC15	9±0 ab	-	-	-	-	-
Pr>F	0,0001	0,0033	0,057	0,0006	0,027	0,001

Les valeurs portant les mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %

Malgré le constat de variations statistiques significatives, ces tailles d'UCs apparaissent minimales sur la figure 57. Il n'y a pratiquement pas de tendance apparente. Nous avons donc considéré que l'on peut regrouper les UC comme provenant d'une unique distribution.



n_{uc} : cycle de développement, T : taille d'échantillon, M_{int} : moyenne, V_{int} : variance, P_{int} : Probabilité.
 Observation de tendance non évidente avec petite variabilité (négligeable)

Figure 57 : variabilité de la moyenne, de la variance et du Bernouilli du nombre de phytomère par UC le long des tiges

Variabilité de chez *Khaya senegalensis* (a), *Pterocarpus erinaceus* (b) et chez *Parkia biglobosa*.

7.3.1.1. Modélisation du fonctionnement des méristèmes

7.3.1.1.1. Modélisation du nombre d'unité de croissance par tige

A 24 mois (2 ans) chez *Khaya senegalensis*, il y'a un maximum de 15 et 7 UCs par tige respectivement à Daloa et Korhogo. La distribution du nombre d'UC par tige à 24 mois s'ajuste à une loi binomiale positive $B(15, 0,78)$ à Daloa et $B(7, 0,6)$ à Korhogo (Figure 58a et b). Ce qui correspond à une préformation des UCs dans les bourgeons terminaux des axes selon le processus de Bernoulli. A Daloa, le taux de préformation a été de 78 % alors qu'à Korhogo ce taux a été de 60 %. Les méristèmes ont une durée de fonctionnement longue à Daloa et courte à Korhogo. Le méristème arrête son fonctionnement après 15 coups maximum à Daloa et 7 coups maximum à Korhogo.

Chez *Pterocarpus erinaceus*, il y'a un maximum de 11 et 8 UCs par tige respectivement à Daloa et Korhogo. La distribution du nombre d'UC par tige à 24 mois s'ajuste à une loi binomiale positive (Figure 58a1 et b1). Ce qui correspond comme chez l'espèce précédente, à une préformation des UCs par les méristèmes selon un processus de Bernoulli. À Daloa, la préformation est caractérisée par les paramètres $B(11, 0,66)$ contre $B(8, 0,5)$ à Korhogo. Le le taux de préformation a été de 66 % à Daloa contre 50 % à Korhogo. Les méristèmes ont une durée de fonctionnement longue à Daloa qu'à Korhogo. Le méristème arrête son fonctionnement après 11 coups maximum à Daloa et 8 coups maximum à Korhogo (figure 58a1 et b1).

Chez *Parkia biglobosa* à 24 mois, il y'a un maximum de 10 et 6 UCs par tige respectivement à Daloa et Korhogo. Quel que soit l'âge physiologique des méristèmes, les distributions du nombre d'unité de croissance sont ajustables par une binomiale positive, qui correspond à des unités de croissance préformées des tiges (Figure 58a2 et b2). Chez *Parkia biglobosa*, les unités de croissance sont donc préconçues dans le méristème de la tige et cela quelle que soit la station. Elles apparaissent et se mettent en place au fil du temps pendant l'organogénèse. À Daloa, la distribution s'ajuste à une loi binomiale positive contrôlée par les paramètres $B(10, 0,57)$, alors qu'à Korhogo, la distribution s'ajuste à une loi de poisson de paramètre ($\lambda=n*b, b=p$), qui elle-même est une approximation de la loi binomiale de paramètre $B(6, 0,90)$. La préformation à été faible avec un taux de 57 % à Daloa et forte à Korhogo avec un taux de 90 % (Figure 58a2 et b2).

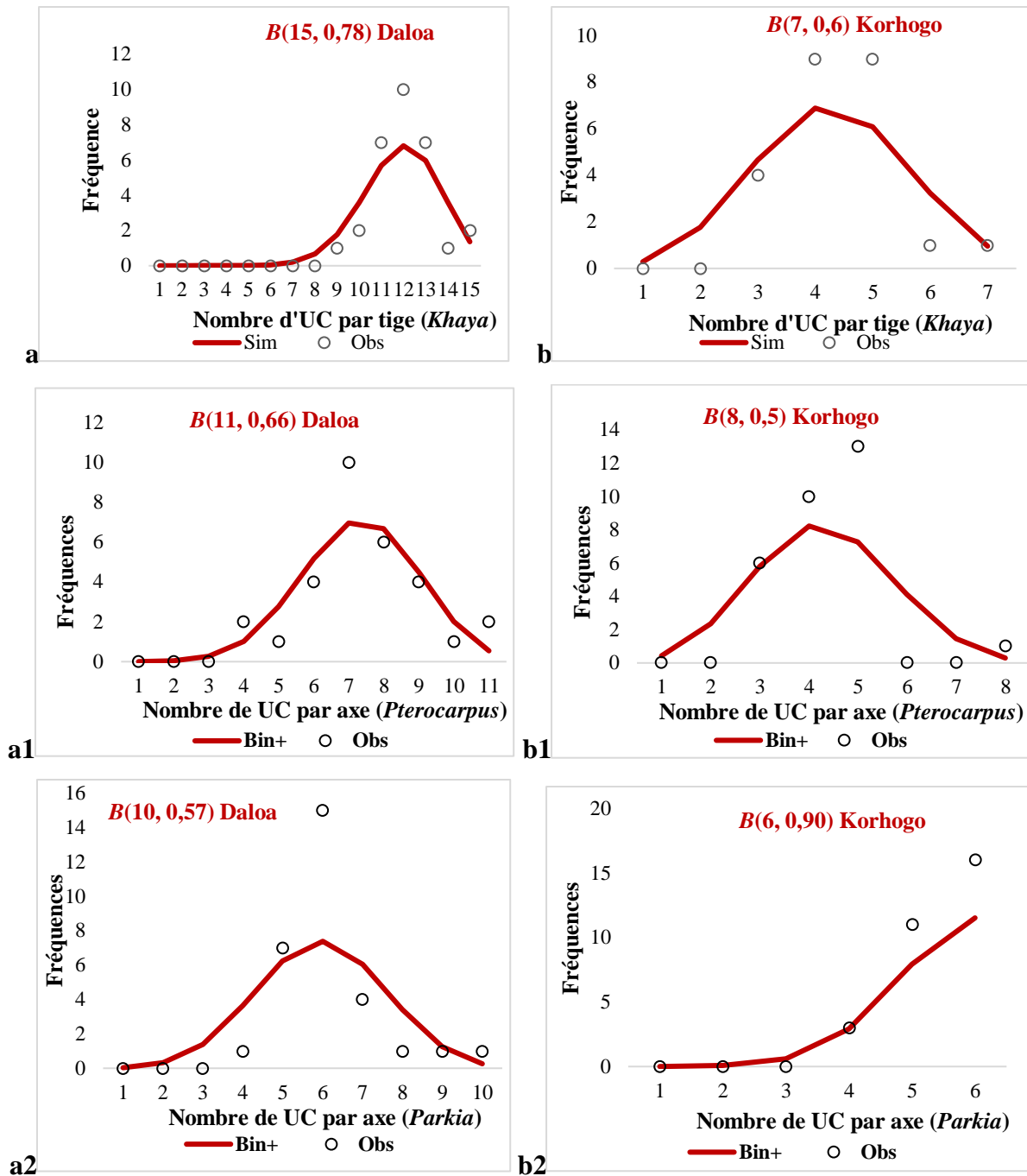


Figure 58 : distributions préformées des UC dans les tiges issues du fonctionnement des méristèmes

Distribution chez *Khaya senegalensis* (a et b), *Pterocarpus erinaceus* (a1 et b1) et chez *Parkia biglobosa* (a2 et b2) à Daloa (a, a1 et a2) et à Korhogo (b, b1 et b2).

Sim : valeur et courbe calculées et simulées par le modèle, *Bin+* : valeur et courbe de la Binomiale positive simulées par le modèle, *Obs* : valeur observée sur le terrain. Les données simulées sont indiquées par la courbe pleine et les données observées sont noté (o).

7.3.1.1.2. Modélisation du nombre de phytomères par unité de croissance le long des tiges

Chez *Khaya senegalensis*, la distribution du nombre de phytomères par UC (page 134) suit une loi composée délimité par une loi d'arrêt. Une partie préformée qui suit une loi

binomiale positive : $B(7, 0,78)$ à Daloa et $B(6, 0,55)$ à Korhogo (figure 59a et b ; courbe grise), et une partie néoformée qui suit une loi binomiale négative : $BN(2, 0,73)$ à Daloa et $BN(2, 0,78)$ à Korhogo (figure 59a et b : courbe grise). Ces deux lois sont délimitées par une loi d'arrêt (a) caractérisée par le taux de passage à la néoformation : $a=0,9$ à Daloa et $a=0,74$ à Korhogo (figure 59a et b ; courbe grise). Cette loi composée est simplifiée en une seule loi binomiale négative simple et flexible de paramètres : $BN(12, 0,56)$ à Daloa et $BN(16, 0,68)$ à Korhogo (figure 59a et b ; courbe rouge). Il est stipulé dans ce cas que, tous les phytomères sont directement néoformés dans les bourgeons.

Les résultats ont montré que, les préformations diffèrent d'une station à une autre (78 % à Daloa et 55 % à Korhogo), alors que les néoformations sont pratiquement identiques d'une station à l'autre. A Daloa, 73 % des méristèmes continuent de fonctionner à chaque cycle, il n'y a pas d'arrêt rapide en néoformation. Quant à Korhogo, 78 % des méristèmes continuent de fonctionner à chaque cycle de développement. Dans les lois binomiales simples, les distributions ont été ajustées de sorte que les phytomères passent directement en néoformation, compte tenu de leur faible taux de préformation. Les paramètres de ces ajustements sont caractérisés par $BN(12, 0,56)$ à Daloa et $BN(16, 0,68)$ à Korhogo (figure 59a et b ; courbe rouge).

Sur tous les l'âges physiologique des méristèmes chez *Pterocarpus erinaceus*, les résultats ont montré que les distributions du nombre de phytomère par UC sont ajustables à une binomiale positive plus une binomiale négative avec une probabilité de passage de la pré à la néoformation. Cela correspond respectivement aux phytomères préformés et néoformés dans les UCs (figure 59a1 et b1 ; courbe grise). La tendance de ces deux lois cumulées est simplifiable à une unique loi binomiale négative, à cause du taux faible de phytomère préformés dans les UC (figure 59a1 et b1 ; courbe rouge). Dans ce cas, la distribution des phytomères est attribuée à une binomiale négative décalées d'environ quelque phytomères. Les paramètres de lois non décalés (préformation) et décalés (néoformation) ne diffèrent pas d'une UC à une autre le long des axes chez *Pterocarpus erinaceus*. La néoformation des phytomères dans les UCs augmente avec l'évolution de l'âge physiologique des méristèmes.

Quel que soit la station, le taux de préformation a été faible (58 % à Daloa et 57 % à Korhogo) que celui de la néoformation (68 % à Daloa et 75 % à Korhogo). Le phénomène de préformation est presque identique d'une station à une autre, contrairement à la néoformation qui est forte à Korhogo qu'à Daloa. A Daloa, 68 % des méristèmes continuent de fonctionner à chaque cycle. Quant à Korhogo, 75 % des méristèmes continuent de fonctionner à chaque cycle

de développement. Ces tendances sont simplifiables par un ajustement de binomiale négative (figure 59a1 et b1 ; courbes rouges). Dans ce cas, tous les phytomères fabriqués par le méristème ont été caractérisés par les paramètres d'ajustement $BN(18, 0,69)$ avec un taux de néoformation de 69 % à Daloa et $BN(10, 0,62)$ avec un taux de néoformation de 62 % à Korhogo.

Chez *Parkia biglobosa*, les distributions du nombre de phytomère par UCs sont ajustables par une binomiale positive plus une binomiale négative, qui correspondent respectivement aux phytomères préformées et néoformées dans les UCs. Le nombre de phytomère par UC augmente de la préformation à la néoformation. Dans la majorité des axes, le nombre de phytomère de la préformation est négligeable au profit de la néoformation. La néoformation des phytomères dans les UCs augmente avec l'âge physiologique et le cycle de développement des méristèmes. Ce phénomène est attribué à un processus de renouvellement sur plusieurs périodes successives.

Les résultats ont montré que 79 % des méristèmes continuent de fonctionner à chaque cycle à la station de Daloa. À Korhogo, le taux de préformation est faible (59 %) au profit de la néoformation (82 %). La néoformation est une loi géométrique avec 70 % des méristèmes à Daloa et 82 % des méristèmes à Korhogo qui continuent de fonctionner à chaque cycle. Cela ne donne pas un arrêt rapide du fonctionnement du méristème en néoformation (figure 59a2 et b2, courbes grises). À Daloa, la préformation prend fin rapidement après 7 coups sur 19 coups et le méristème arrête son fonctionnement en 19 cycles après la néoformation (figure 59a2). À Korhogo, la préformation est plus courte (5 coups sur 21), le méristème prend plus de temps en phase de néoformation avant son arrêt (21 cycles) (figure 59b2). Ces deux constats donnent un poids à la néoformation et montre que la préformation peut être négligé au profit de la néoformation (figure 59a2 et b2 ; courbes rouges).

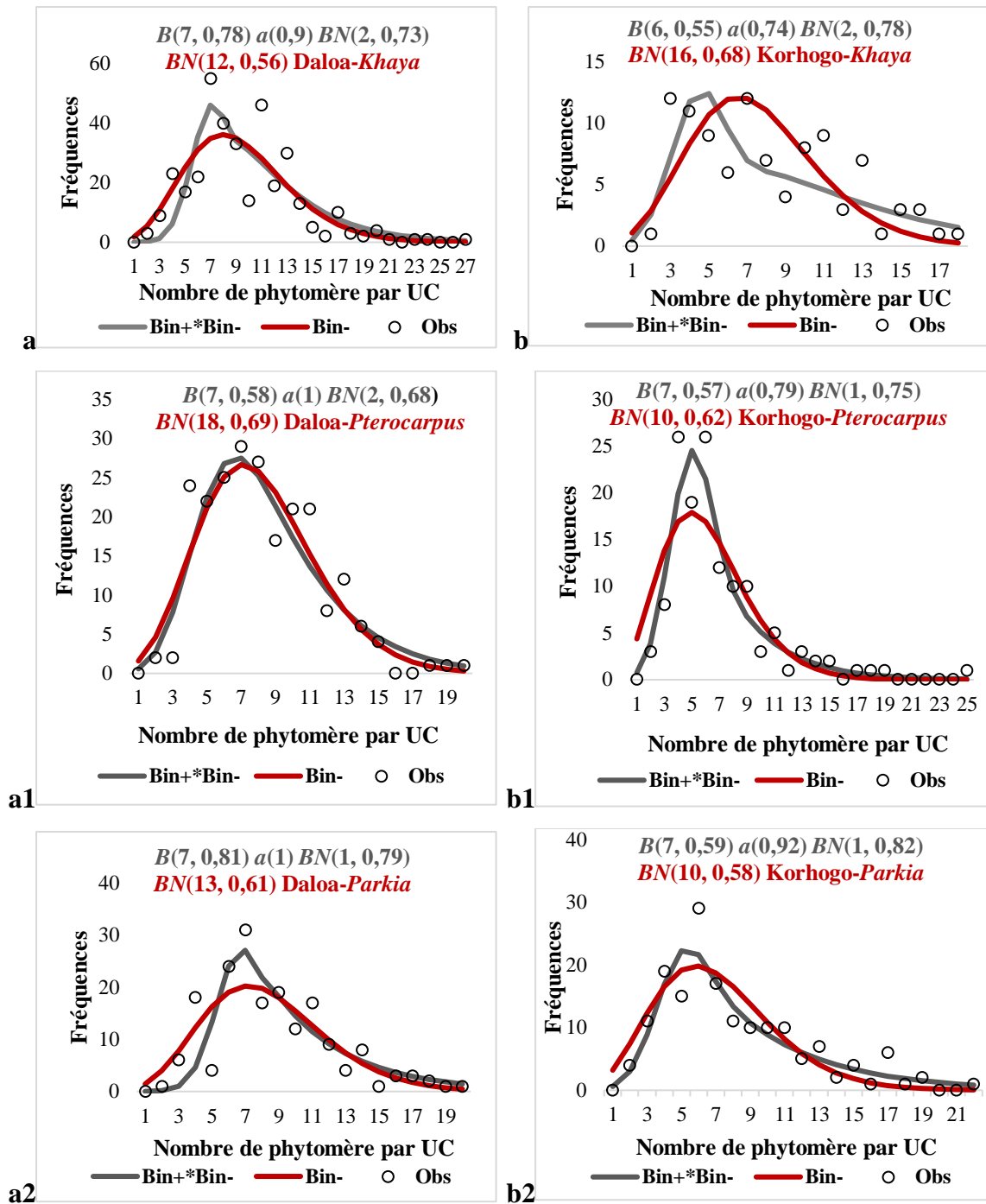


Figure 59 : distributions binomiales calculées (courbes) et observées (o) du nombre de phytomère des unités de croissance pré/néoformées (courbes grises) et néoformées (courbes rouges) le long des axes

Distribution chez *Khaya senegalensis* (a et b), *Pterocarpus erinaceus* (a1 et b1) et chez *Parkia biglobosa* (a2 et b2) à Daloa (a, a1 et a2) et à Korhogo (b, b1 et b2). Les données calculées sont indiquées par la courbe pleine et les données observées sont noté (o).

7.3.1.1.3. Modélisation du nombre de phytomère par tige

La totalisation du nombre de phytomères par UC donne le nombre de phytomères par tige. La multiplication du nombre d'UC des tiges par le nombre de phytomère contenu dans UC donne le nombre total de phytomère dans une tige. La figure 60 présente un exemple du fonctionnement et de la distribution probabiliste de ce phénomène.

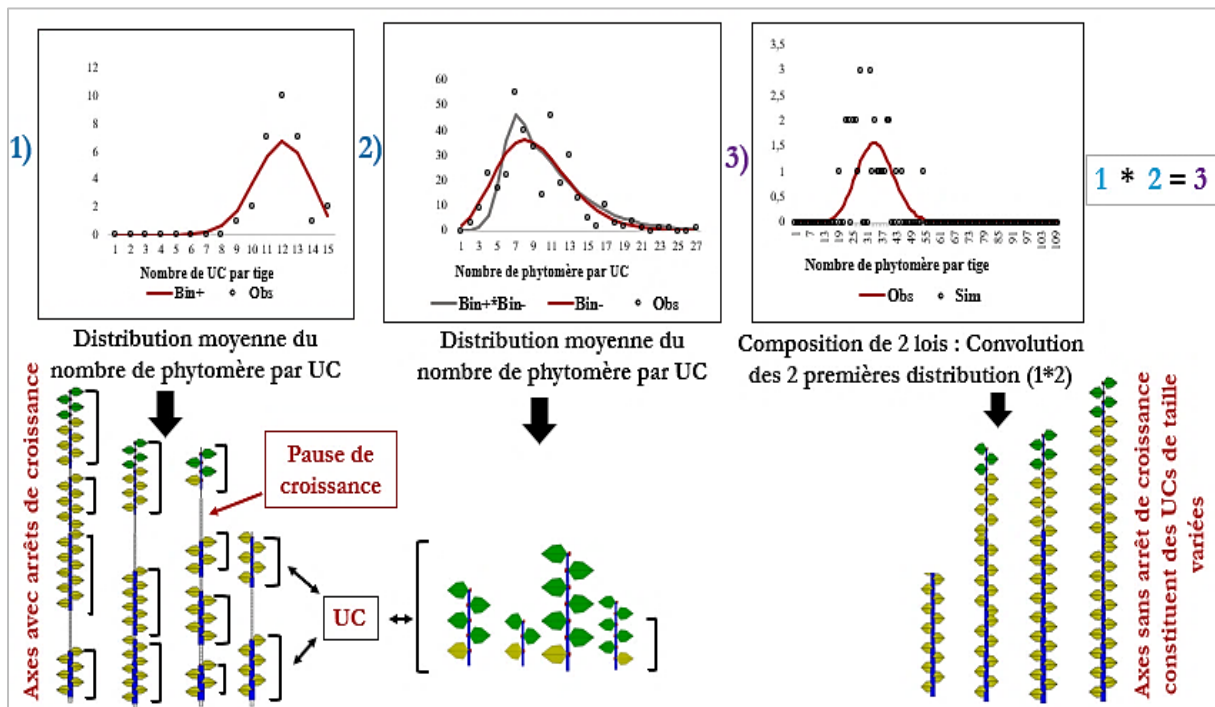


Figure 60: images relatives au fonctionnement du méristème dans la construction des phytomères le long d'une tige à croissance rythmique à du processus de *Montecarlo*.

Une tige de 7 UC à Daloa et 6 UC à Korhogo sont simulées (Figure 61), ce qui correspond à 12 mois du développement chez *Khaya senegalensis*. La distribution du nombre de phytomère par tige à ce stade suit une loi binomiale composée de paramètre $B(7, 0,78)$ et $BN(2, 0,73)$ à Daloa (Figure 61a et a1) puis $B(6, 0,55)$ et $BN(2, 0,78)$ à Korhogo (Figure 61b et b1).

Les figures 61a et b donnent le nombre d'UC par tige et les figures 61 a1 et b1 donnent le nombre de phytomère par tige issus de la composition et de la multiplication des lois du nombre d'UC par tige et du nombre de phytomère par UC dans les tiges, respectivement à Daloa et Korhogo.

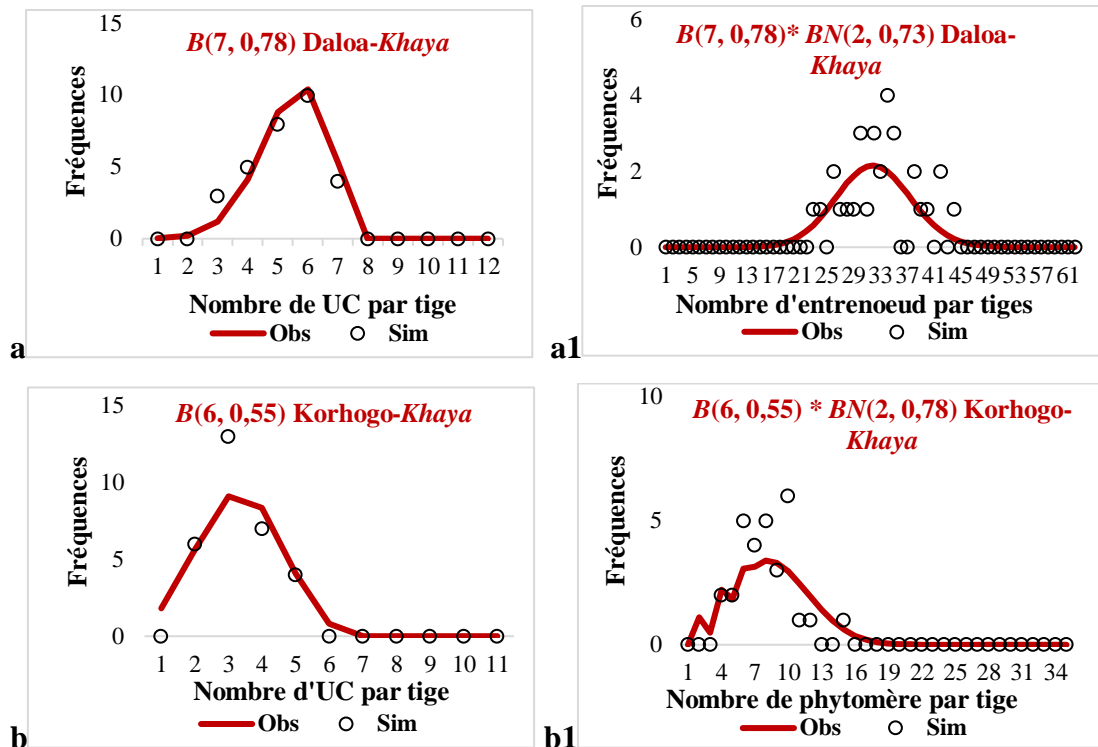


Figure 61 : distribution binomiale observée (o) et calculée (courbe) du nombre d’unité de croissance et du nombre de phytomère par tige chez *Khaya senegalensis*

Distribution du nombre d’UC (a et b) et du nombre de phytomère (a1 et b1) à Daloa (a et a1) et à Korhogo (b et b1)

Chez *Pterocarpus erinaceus*, une tige de 7 UC à Daloa et à Korhogo sont simulées (Figure 62). La distribution du nombre de phytomère par tige suit une loi binomiale composée de paramètre $B(7, 0,58)$ et $BN(2, 0,68)$ à Daloa (Figure 62a et a1) et $B(7, 0,57)$ et $BN(1, 0,75)$ à Korhogo (Figure 62b et b1).

Les figures 62a et b donnent le nombre d’UC par tige et les figures 62a1 et b1 donnent le nombre de phytomère par tige issus de la composition des lois du nombre d’UC par tige et du nombre de phytomère par UC des tiges respectivement à Daloa et à Korhogo. Dans les deux stations les méristèmes fonctionnent à des rythmes presque similaires (figure 62).

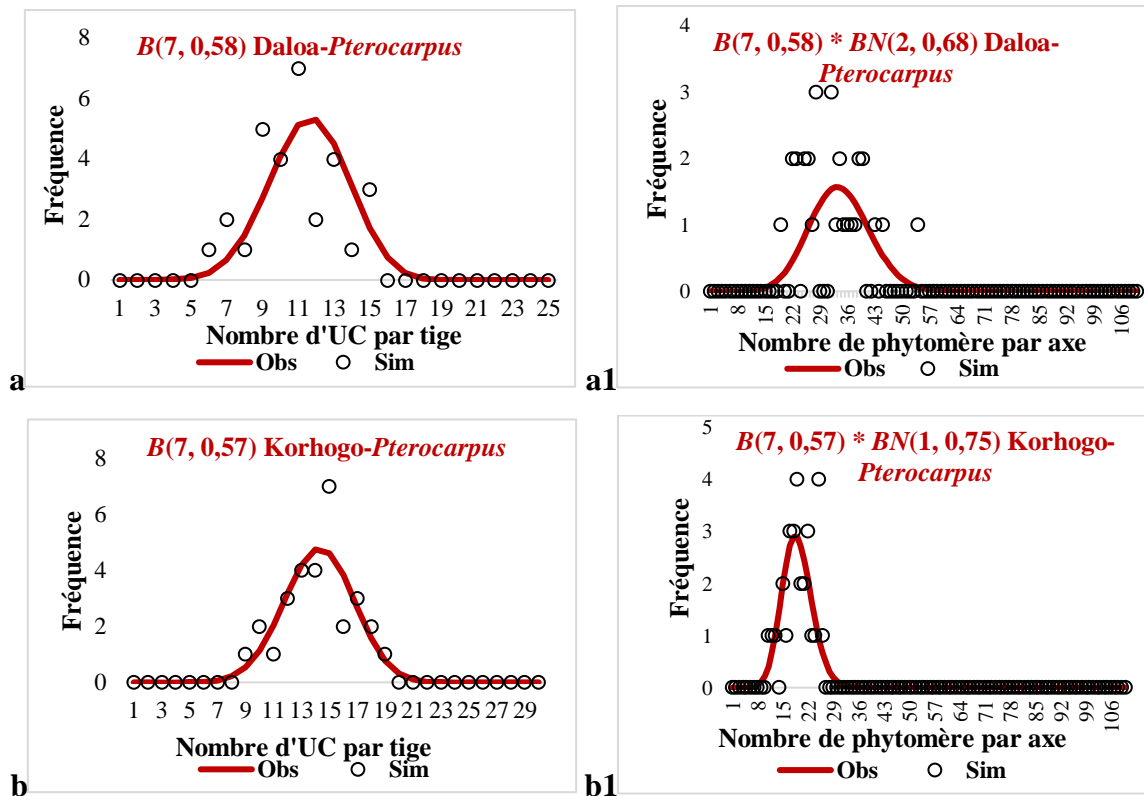


Figure 62 : distribution binomiale observée (o) et calculée (courbe) du nombre d'UC et du nombre de phytomère par tige chez *Pterocarpus erinaceus*

Distribution du nombre d'UC (a et b) et du nombre de phytomère (a1 et b1) à Daloa (a et a1) et à Korhogo (b et b1)

Chez *Parkia biglobosa*, une tige de 7 UC à Daloa et à Korhogo sont simulées (Figure 63). La distribution du nombre de phytomère par tige suit une loi binomiale composée de paramètre $B(7, 0,81)$ et $BN(1, 0,79)$ à Daloa (Figure 63a et a1) et $B(7, 0,59)$ et $BN(1, 0,82)$ à Korhogo (Figure 63b et b1). Les figures 63a et b donnent le nombre d'UC par tige et les figures 63a1 et b1 donnent le nombre de phytomère par tige issus de la composition des lois du nombre d'UC par tige et du nombre de phytomère par UC dans les tiges respectivement à Daloa et à Korhogo. Les phases de préformations sont différentes d'une station à l'autre alors que les néoformations sont presque les mêmes dans les deux stations.

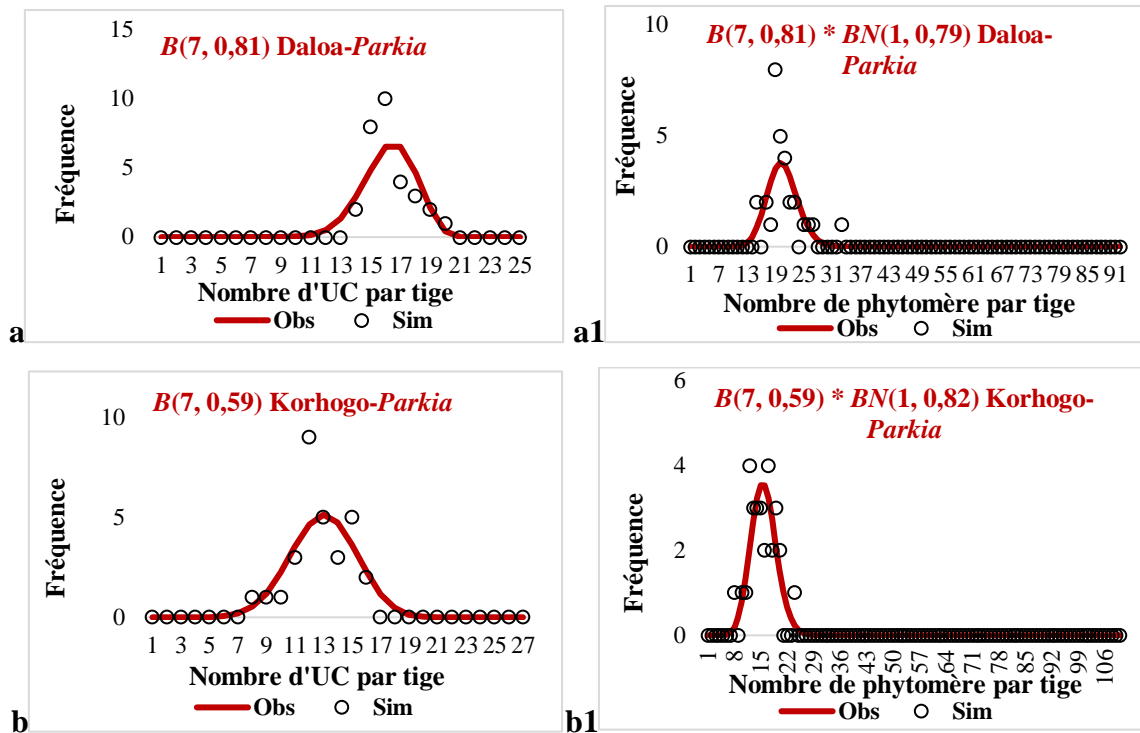


Figure 63 : distribution binomiale observée (o) et calculée (courbe) du nombre d'UC et du nombre de phytomère par tige chez *Parkia biglobosa*

Distribution du nombre d'UC (a et b) et du nombre de phytomère (a1 et b1) à Daloa (a et a1) et à Korhogo (b et b1)

7.3.1.1.4. Modélisation du fonctionnement des méristèmes des branches

Chez *Khaya senegalensis*, les branches apparaissent à partir de la 10^{ème} et 4^{ème} UC sur le tronc respectivement à Daloa et à Korhogo. Les méristèmes des branches fonctionnent d'une façon analogue à celui des tiges mais avec des paramètres différents. La distribution du nombre d'UC par branche suit une binomiale positive (préformation) caractérisé par $B(3, 0,35)$ à Daloa et $B(3, 0,67)$ à Korhogo (Figure 64a et b). La distribution du nombre de phytomère par UC s'ajuste à une loi composée avec des parties préformées (binomiale) et néoformées (binomiale négative). Cette distribution est caractérisée par les paramètres suivants : $B(5, 0,70)$ et $BN(2, 0,65)$ à Daloa, la loi d'arrêt a vaut 1 (Figure 64a1 ; courbe grise) puis $B(4, 0,49)$ et $BN(2, 0,57)$ à Korhogo, la loi d'arrêt a vaut également 1 (Figure 64b1 ; courbe grise) . Ces lois peuvent être simplifiées par une simple loi binomiale négative (Figure 64a1 et b1 ; courbe rouge), qui caractérise le passage des phytomères systématiquement en néoformation $BN(12, 0,66)$ à Daloa et $BN(16, 0,78)$ à Korhogo.

Chez les branches de *Khaya senegalensis*, les méristèmes peuvent fonctionner selon deux modes (Figure 64a1 et b1 ; courbes grise et courbe rouge). Chez certains, les phytomères

sont pré et néoformés (loi composée) dans les UC (cas d'un débourrement ou développement différé) avec une loi d'arrêt négligeable. Cela signifie que le méristème n'émet pas de repos après le processus de préformation comme dans les tiges. Par contre, chez d'autres méristèmes, les phytomères des UC sautent la phase de préformation et passe tous directement en néoformation. Le méristème émet des phytomères successifs au seins de chaque UC après une longue phase de dormance (cas d'un débourrement ou développement immédiat) à l'aisselle des feuilles. Dans le premier cas, (pré/néoformation : combinaison de loi binomiale positive et négative), les phytomères préformés dans le bourgeon varient de 49 à 70 %, ensuite de 57 à 65 % de phytomères néoformés à chaque cycle.

Dans les cas où tous les phytomères sont néoformés, les méristèmes fonctionnent que de 66 à 78 % à chaque cycle de développement. Le premier mode ($Bin+ * Bin-$) peut être négligé à cause de l'ajustement parfait de l'ensemble des phytomères à une loi binomiale négative. La distribution est donc simplifiée au deuxième mode de fonctionnement des méristèmes (néoformation). On considère dans ce cas que, les phytomères des UCs des branches sont néoformés par les méristèmes chez *Khaya senegalensis*.

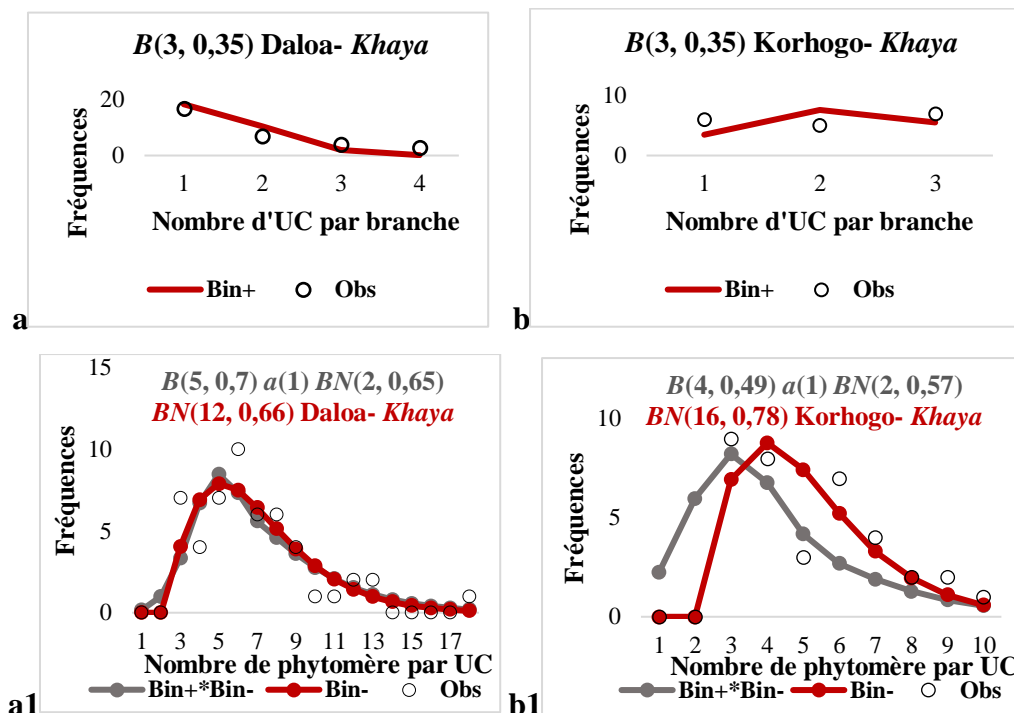


Figure 64 : distribution binomiale calculées (courbe) et observées (o) nombre d'UC préformé par branche et du nombre de phytomère pré/néoformé et néoformé par UC sur les branches de *Khaya senegalensis*

Distribution du nombre d'unité de croissance par branche (a et b), distribution du nombre phytomère pré/néoformé (courbes grises) et néoformé (courbes rouges) par UC sur les branches (a1 et b1) à Daloa (a et a1) et Korhogo (b et b1)

Chez *Pterocarpus erinaceus*, les branches apparaissent à partir de la 3^{ème} et 2^{ème} UC sur le tronc respectivement à Daloa et à Korhogo. Chez les branches de *Pterocarpus erinaceus*, la distribution du nombre d'UC par branche suit une binomiale positive de paramètre $B(5, 0,22)$ à Daloa et $B(5, 0,26)$ à Korhogo (Figure 65a et b). La distribution du nombre de phytomères par UC suit une binomiale positive suivit d'une binomiale négative représentant respectivement les phytomères préformés et néoformés (figure 65a1 et b1 ; courbes grises) simplifiable à une binomiale négative (figure 65a1 et b1 ; courbes rouges). Dans ce dernier, les phytomères sont successivement néoformés par le méristème. Le passage de la préformation à la néoformation est automatique sans pause du méristème (développement continue après débourrement immédiat) dans le cas de la pré/néoformation. Dans le cas de la néoformation (développement discontinue après débourrement différé), le méristème à l'aisselle de la feuille reste longtemps en phase de dormance. Le premier cas représente 67 à 78 % des bourgeons en préformation qui passe automatiquement en néoformation avec des taux de 39 à 55 % à chaque cycle de développement. Le deuxième cas (néoformation) représente 80 à 67 % des méristèmes fonctionnant de façon continue à chaque cycle.

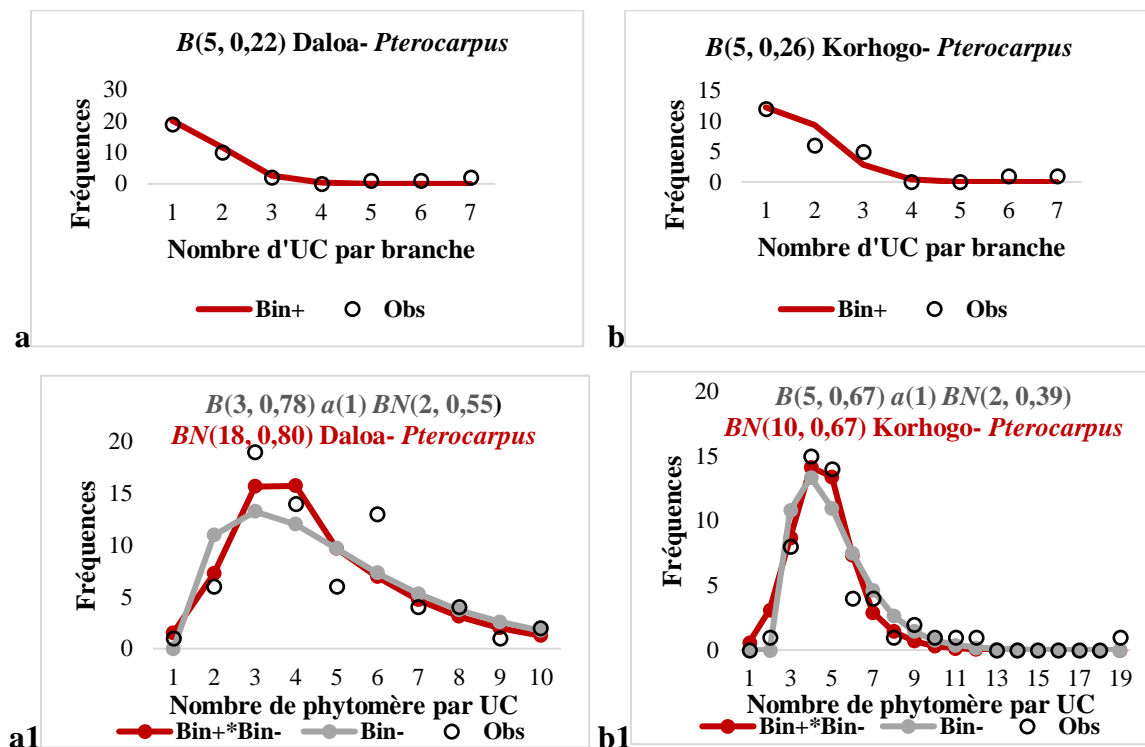


Figure 65 : distribution binomiale calculées (courbe) et observées (o) nombre d'UC préformé par branche et du nombre de phytomère pré/néoformé et néoformé par UC sur les branches de *Pterocarpus erinaceus*

Distribution du nombre d'unité de croissance par branche (a et b), distribution du nombre phytomère pré/néoformé (courbes grises) et néoformé (courbes rouges) par UC sur les branches (a1 et b1) à Daloa (a et a1) et Korhogo (b et b1)

Chez *Parkia biglobosa*, les branches apparaissent à partir de la 5^{ème} et 2^{ème} UC sur le tronc respectivement à Daloa et à Korhogo. Quelle que soit la station, la distribution du nombre d'UC par branche suit une binomiale positive (préformation) caractérisé par les paramètres $B(3, 0,31)$ à Daloa et $B(3, 0,15)$ à Korhogo (Figure 66a et b). Par contre, la distribution du nombre de phytomère des unités de croissance des branches s'ajuste à une binomiale positive plus une binomiale négative. Ce qui correspond respectivement aux phytomères préformés et néoformés dans les unités de croissance (figure 66a1 et b1). Le passage de la préformation à la néoformation est immédiat avec une loi d'arrêt négligeable du méristème. 53 à 91 % des méristèmes émettent des phytomères préformés dans les UC. Les méristèmes enchainent la phase de néoformation à chaque cycle avec un taux de 64 à 69 % (figure 66a1 et b1 ; courbes grises). Cette distribution de loi composée peut être ajusté à une simple loi binomiale décalée de 2 phytomères. La distribution s'ajuste aussi bien et est meilleur que la précédente (pré/néoformation). Dans ce cas, 63 à 76 % des méristèmes émettent que des phytomères néoformés à chaque cycle (figure 66a1 et b1 ; courbes rouges).

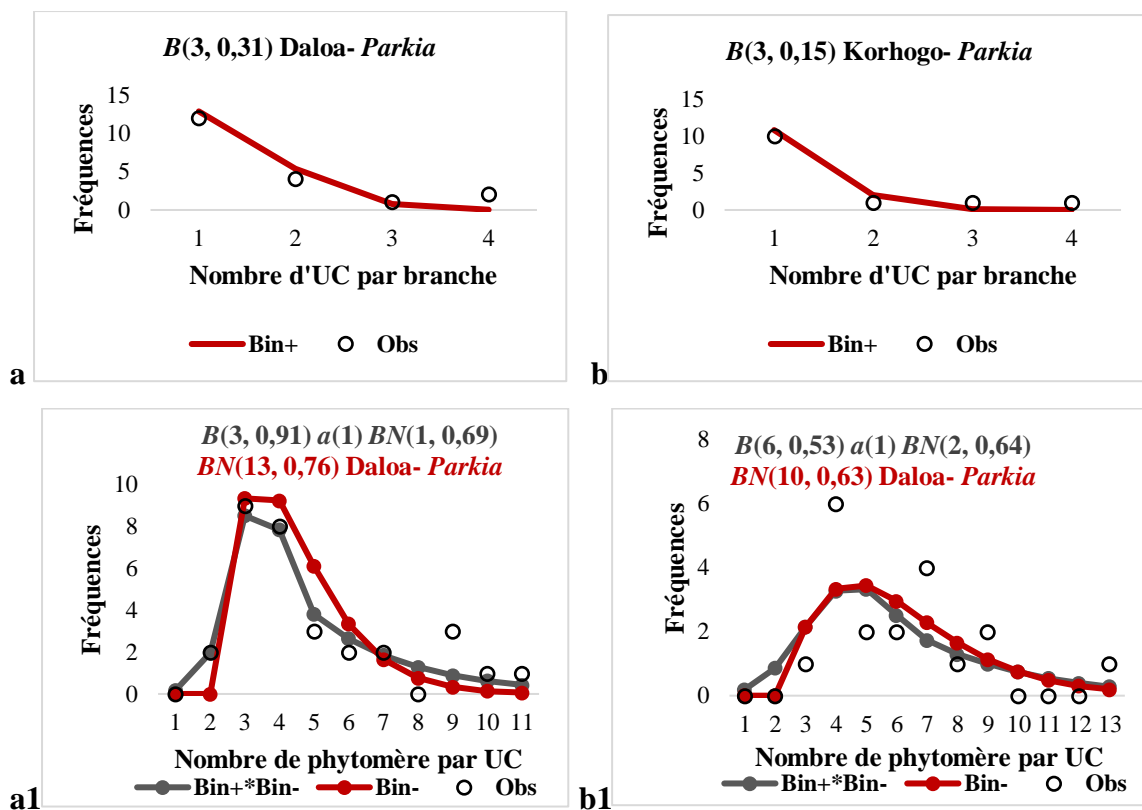


Figure 66 : distribution binomiale calculées (courbe) et observées (o) nombre d'UC préformé par branche et du nombre de phytomère pré/néoformé et néoformé par UC sur les branches de *Parkia biglobosa*

Distribution du nombre d'unité de croissance par branche (a et b), distribution du nombre phytomère pré/néoformé (courbes grises) et néoformé (courbes rouges) par UC sur les branches (a1 et b1) à Daloa (a et a1) et Korhogo (b et b1)

La figure 67 montre un récapitulatif de la répartition des paramètres d’ajustements selon les stations et les entités d’organes considérées par lois d’ajustement. Les groupes 1, 2 et 3 constituent les valeurs des paramètres d’ajustements des lois calculées respectivement pour les espèces *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* et *Parkia biglobosa*.

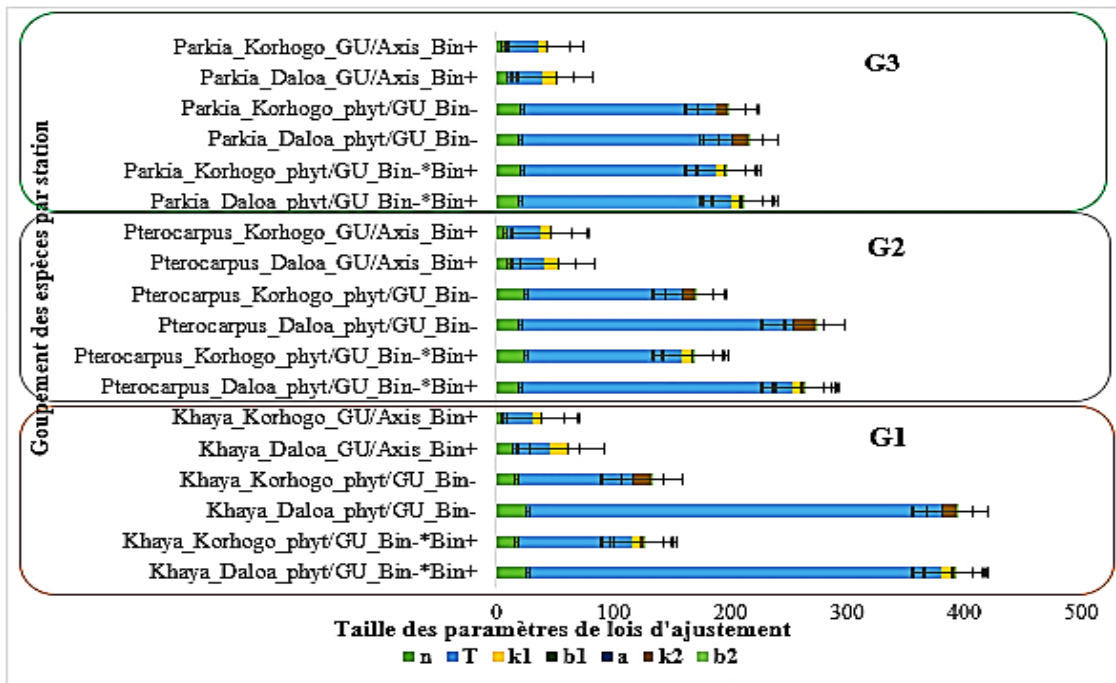


Figure 67 : groupement des espèces par station et par caractéristique de loi d’ajustement

n =Cycle de développement du bourgeon, T =Taille d’échantillon, $k1$ =Taux de préformation, $b1$ =Probabilité de faire de la préformation, a =Loi d’arrêt ou probabilité de passage de la pré à la néoformation, $k2$ =Taux de néoformation, $b2$ =Probabilité de faire de la néoformation

7.3.1.2. Modélisation du développement

7.3.1.2.1. Modélisation de la ramification : plasticité de l'unité de croissance

Chez *Khaya senegalensis*, sur un échantillon de 30 individus étudiés à Daloo, 25 individus sont ramifiés (le taux de ramification A est de 83,33%). La ramification de la tige n’apparaît qu’à partir de l’UC 10 et s’intensifie le long de l’axe (Figure 68). Cela correspond à l’augmentation progressive de la photosynthèse (croissance exponentielle). A Korhogo 16 tiges sur 30 ont eu des branches (taux de ramification A de 53,33 %).

La figure 68 présente le cas d’exemple de la modélisation du branchage des tiges de 2 ans à Daloo et Korhogo.

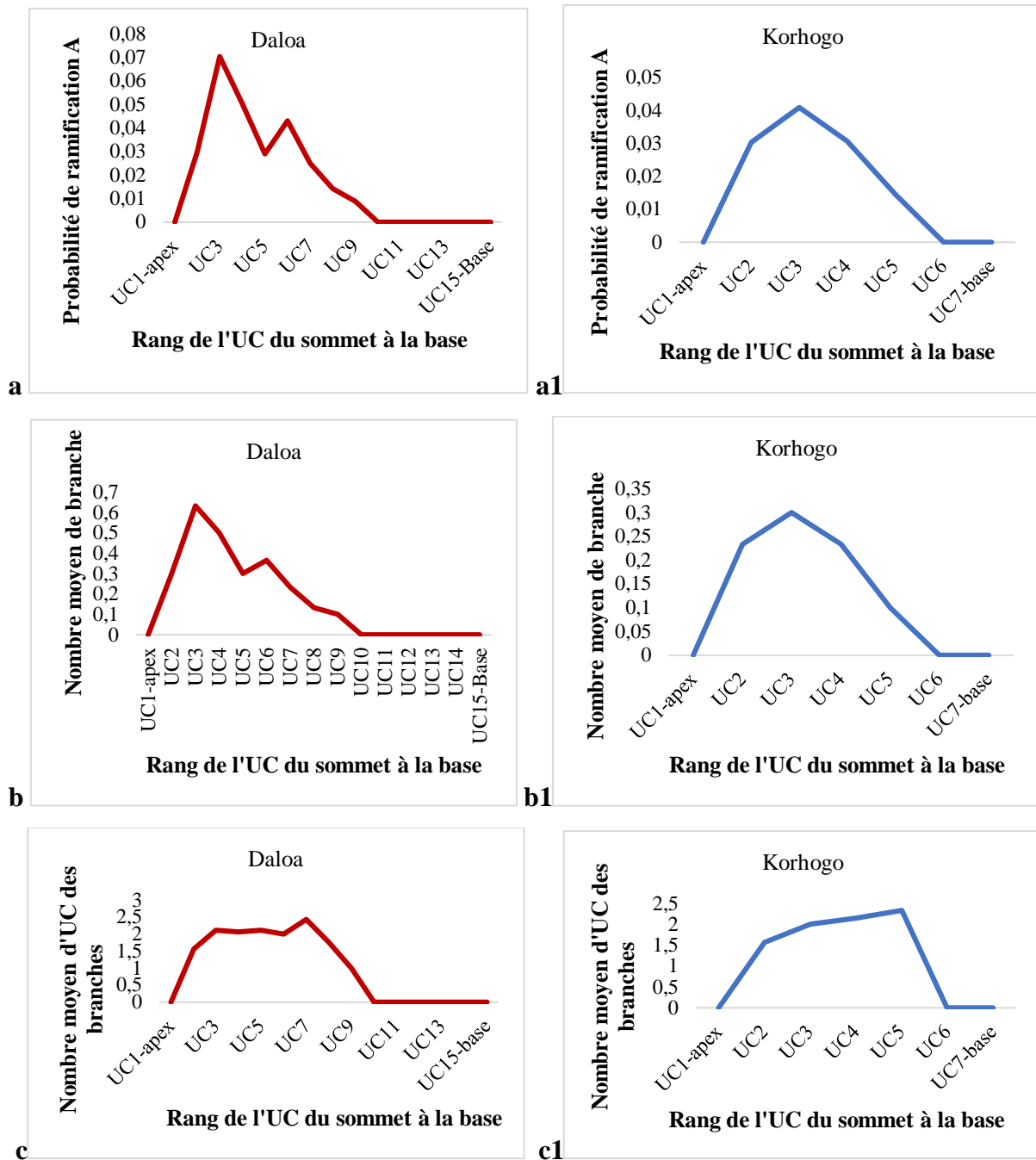


Figure 68 : courbes de probabilité de ramification, du nombre moyen de branche et du nombre moyen d'UC des branches par rang d'UC du sommet à la base des tiges sur un échantillon de 30 individus de 2 ans chez *Khaya senegalensis*

Probabilité de ramification (a et a1), nombre moyen de branche (b et b1) et nombre moyen d'UC des branches (c et c1) à Daloa (a, b et c) et à Korhogo (a1, b1 et c1)

Chez *Pterocarpus erinaceus* à deux ans, le taux de ramification était de 66,66% à Daloa et de 56,66% à Korhogo. La ramification apparaît à partir de la deuxième UC à la base des individus ayant des branches à Daloa (Figure 69). La figure 69 présente les allures des modèles de ramification des tiges de 2 ans à Daloa et à Korhogo.

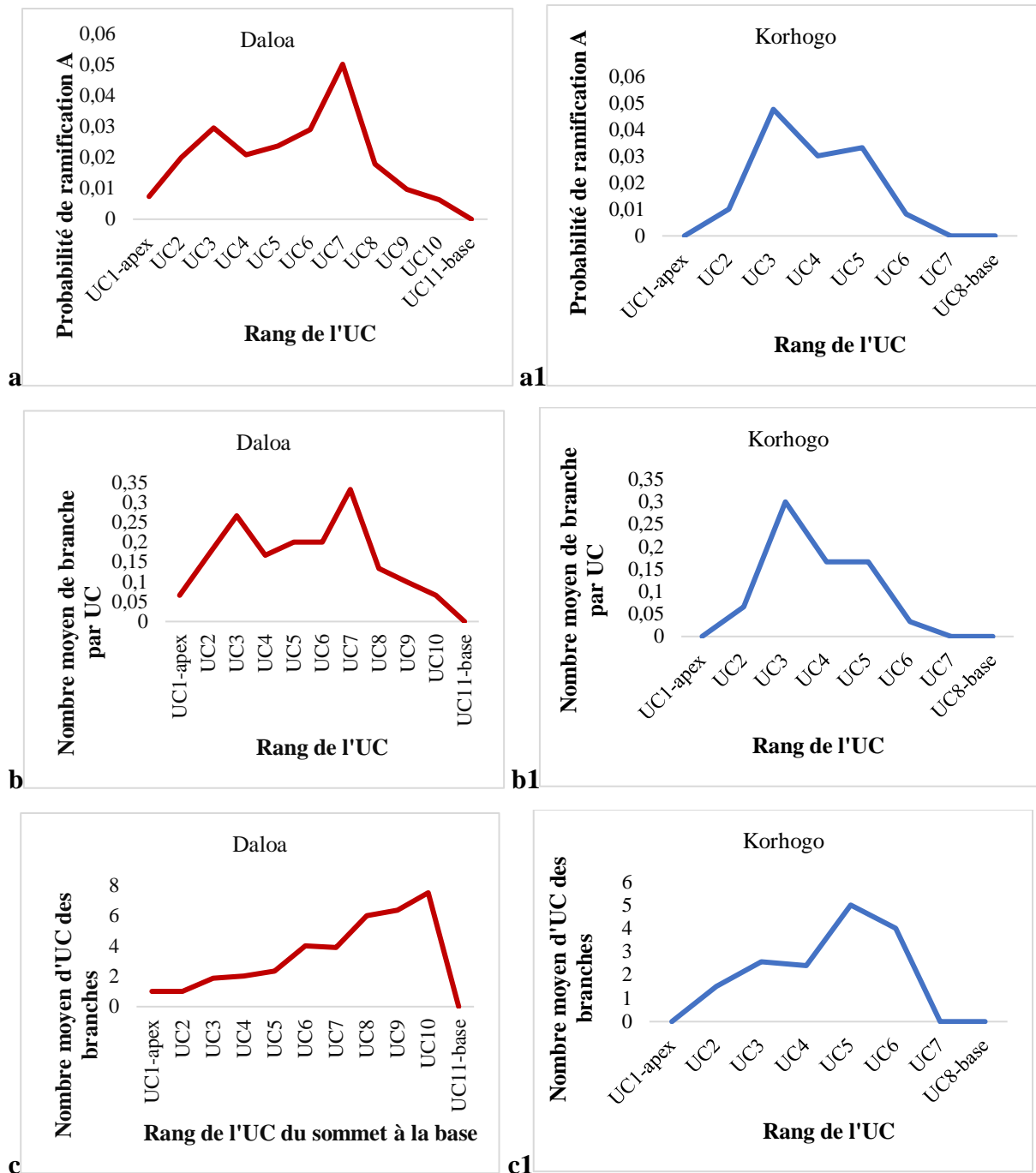


Figure 69 : courbes de probabilité de ramification, du nombre moyen de branche et du nombre moyen d'UC des branches par rang d'UC du sommet à la base des tiges sur un échantillon de 30 individus de 2 ans chez *Pterocarpus erinaceus*

Probabilité de ramification (a et a1), nombre moyen de branche (b et b1) et nombre moyen d'UC des branches (c et c1) à Daloa (a, b et c) et à Korhogo (a1, b1 et c1)

Chez *Parkia biglobosa*, le taux de ramification à deux ans était de 56,66% à Daloa et de 36,66% à Korhogo. La ramification apparaît à partir de la cinquième et de la deuxième UC à partir de la base des individus portant des branches, respectivement à Daloa et à Korhogo

(Figure 70). La figure 70 présente le cas d'exemple de la modélisation du branchage des tiges de 2 ans à Daloa et à Korhogo.

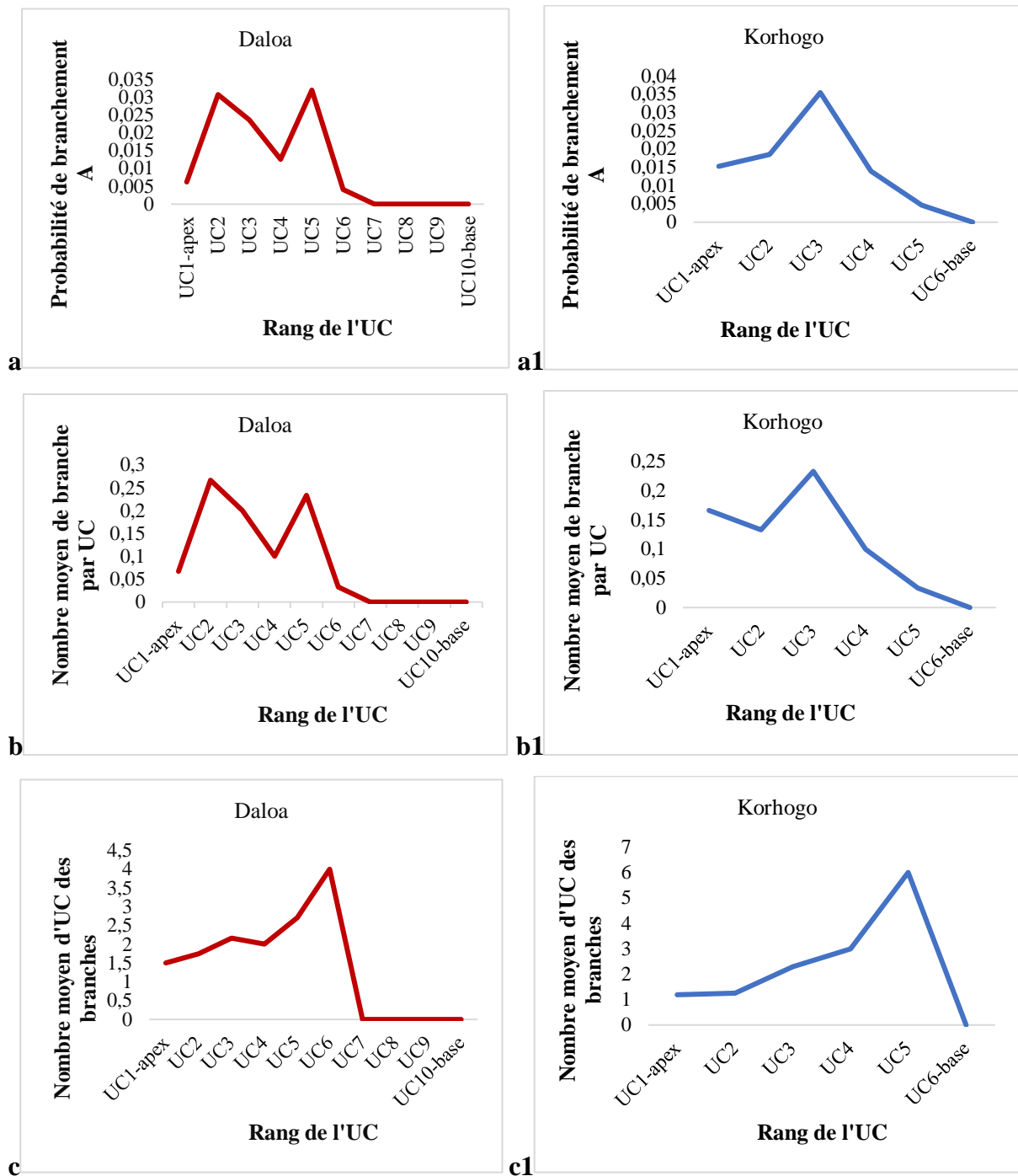


Figure 70 : courbes de probabilité de ramification, du nombre moyen de branche et du nombre moyen d'UC des branches par rang d'UC du sommet à la base des tiges sur un échantillon de 30 individus de 2 ans chez *Parkia biglobosa*

Probabilité de ramification (a et a1), nombre moyen de branche (b et b1) et nombre moyen d'UC des branches (c et c1) à Daloa (a, b et c) et à Korhogo (a1, b1 et c1)

7.3.1.2.2. Paramètres de développement calculés

Deux manières permettent de calculer les paramètres du développement : l'une avec l'analyse de cime au niveau du phytomère (développement continue) et une autre par analyse de cime au niveau de l'UC (développement rythmique). Les résultats de l'analyse de cime au niveau de l'UC sont utilisés pour la simulation topologique de l'architecture et le calcul de la croissance.

7.3.1.2.2.1. Paramètres du développement calculés au niveau des phytomères

L'analyse de cime au niveau des phytomères (développement continue) fournit les paramètres A , P , B et W . Tous les paramètres de développement calculés étaient nettement plus ou moins stables et différentes d'une station à une autre (Figure 71).

Chez *Khaya senegalensis*, ces paramètres étaient dans l'ensemble, meilleurs à Daloa qu'à Korhogo. Les probabilités de ramification (A) et de développement des branches (B) étaient statistiquement identiques d'une station à une autre ($P > 0,05$), alors que les probabilités de développement des tiges (P) étaient plus grandes à Korhogo (0,91) qu'à Daloa (0,6). Le Bernoulli des tiges ($P = 1 - v/m$: probabilité d'émission de phytomère par le méristème) était plus grand à Korhogo (0,89) qu'à Daloa (0,62). Le rapport de rythme (W : probabilité de croissance des tiges par rapport aux branches) était plus grand à Korhogo (0,92) qu'à Daloa (0,43). Le phyllochrone (temps calendaire d'émission des phytomères successifs par le méristème des axes considérés en jour) était plus grand à Daloa (0,17) qu'à Korhogo (0,07).

Chez *Pterocarpus erinaceus*, la majorité des paramètres étaient supérieurs à Daloa qu'à Korhogo ($P < 0,05$) avec pour valeur P de 0,45 à Daloa contre 0,24 Korhogo. La valeur $P = 1 - v/m$ était de 0,93 à Daloa contre 0,69 à Korhogo. La valeur W était de 0,51 à Daloa contre 0,21 à Korhogo. La valeur B était plus grande à Korhogo (1) qu'à Daloa (0,72). Par contre, la probabilité de ramification (A) et le phyllochrone étaient presque identiques d'une station à une autre ($P > 0,05$).

Les paramètres de développement calculés sur les individus de 2 ans dans les deux stations chez l'espèce *Parkia biglobosa* sont présentés par la figure 71c. Cette figure montre que la valeur P était plus grande à Daloa (0,5) qu'à Korhogo (0,38). La valeur $P = 1 - v/m$ était plus grande à Daloa (0,83) qu'à Korhogo (0,51). Les paramètres A , B , W et le Phyllochrone étant statistiquement identiques d'une station à une autre ($P > 0,05$) (tableau 33).

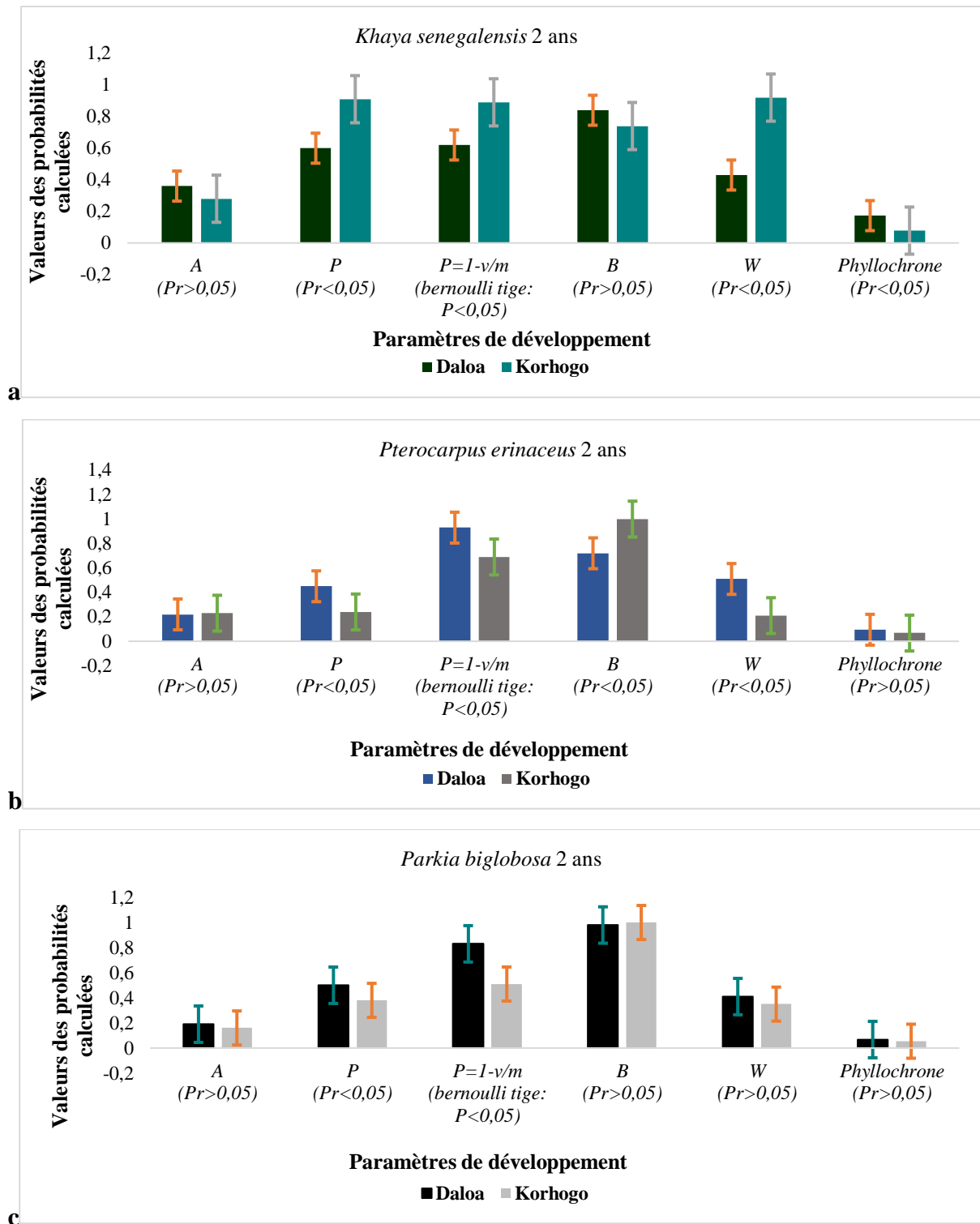


Figure 71 : histogrammes des paramètres probabilistes de développement topologique des individus de 2 ans

Probabilités de développement chez *Khaya senegalensis* (a), *Pterocarpus erinaceus* (b) et *Parkia biglobosa* (c)

Le tableau 33 compare l'ensemble de tous les paramètres de développement calculés dans les deux stations considérées, selon l'analyse de cime au niveau du phytomère. Il s'agit : du cycle de développement ou âge chronologique ou physiologique (N), de la probabilité de ramification des tiges (A), du rang d'apparition des premiers rameaux (Na), de la puissance de ramification des tiges (Aa), de la probabilité de développement des tiges (P), de la probabilité d'apparition ou de fabrication d'un phytomère par la tiges ($P=1-v/m$), de la probabilité de développement des branches (B), du rapport de rythme ou rythme de développement des branches par rapport au tronc (W), du temps d'expansion (Te) et de fonctionnement (Tf) des feuilles en cycle de développement et du phyllochrone ou nombre de phytomère émis par jour par les méristèmes.

La majorité des paramètres diffère d'une station à une autre ($P<0,05$). Chez *Khaya senegalensis*, les feuilles fonctionnent sur un temps plus long avec de grandes capacités d'expansion à Daloa ($Tf = 26,6$ Cycles de Développement ; $Te = 15,85$ CD) qu'à Korhogo ($Tf = 15,8$ CD ; $Te = 7,1$ CD). Quant au phyllochrone, il a été plus court à Daloa (0,173 phytomère/jour) et plus long à Korhogo (0,078 phytomère/jour). Le temps d'émission d'un phytomère par le méristème est en moyenne environ 5,78 jours à Daloa, alors qu'il faut en moyenne 12,82 jours pour avoir un phytomère sur les axes à Korhogo. Selon l'âge chronologique, les individus plus âgés ont été ceux de Daloa (27 CD) par rapport à ceux de Korhogo (18 CD) (Tableau 33).

Chez *Pterocarpus erinaceus*, la majorité des paramètres diffère d'une station à une autre ($P<0,05$). Le temps d'expansion des feuilles et de fonctionnement des feuilles est plus élevé à Daloa ($Te = 9,5$ Cycle de développement ; $Tf = 15,95$ CD) qu'à Korhogo ($Te = 5,2$ CD ; $Tf = 7,26$ CD). Le phyllochrone a été plus court à Daloa (0,094 phytomère/jour) et plus long à Korhogo (0,067 phytomère/jour). Le temps d'émission d'un phytomère par le méristème des tiges est en moyenne de 10,64 jours à Daloa, alors qu'il faut en moyenne 14,92 jours pour la production d'un phytomère par les méristèmes des tiges à Korhogo. Les individus plus âgés chronologiquement ont été ceux de Korhogo (25 CD) par rapport à ceux de Daloa (20 CD) (Tableau 33).

Quant à *Parkia biglobosa*, les résultats ont montré qu'elle a une très faible probabilité de ramification à deux ans, contrairement aux deux autres espèces décrites plus haut (inférieure à 0,5). Le rang d'apparition des premières branches sur la tige est pratiquement identique à Daloa (6^{ième} unité de croissance) et à Korhogo (5^{ième} unité de croissance) à partir du sommet. Par contre, la puissance de branchement est élevée à Daloa qu'à Korhogo. Les probabilités de

développement des tiges et le Bernoulli calculé des tiges sont grands à Daloa qu'à Korhogo. Les chances de développement des branches sont les mêmes, quelle que soit la station. Le rythme de développement des branches par rapport au tronc et le temps d'expansion des feuilles sont statistiquement identiques dans les deux stations. Quant au temps de fonctionnement des feuilles, il est plus grand à Daloa. Les feuilles fonctionnent plus durablement à Daloa ($Tf = 16,5$ CD) qu'à Korhogo ($Tf = 8,33$ CD). L'analyse de variance a révélé que le phyllochrone est presque identique entre Daloa (0,067 phytomère/jour) et Korhogo (0,054 phytomère/jour). Le temps d'émission d'un phytomère par le méristème des tiges est en moyenne de 14,92 jours à Daloa et de 18,54 jours à Korhogo. L'âge chronologique des individus est pratiquement le même quelle que soit la station (Daloa : 20 CD et Korhogo : 22 CD) (Tableau 33).

Tableau 33: Comparaison des paramètres de développement des deux types d'axes considérés et calculés au niveau du phytomère par station

Espèces	Stations, âges chronologique (N) et effectifs d'individus (T)	Probabilité de ramification des tiges (A)	Rang d'apparition des 1 ^{ère} branches (Na)	Puissance de ramification (αA)	Probabilité de développement des tiges (P)	Lois de bernoulli des tiges ($P=I-v/m$)	Probabilité de développement des branches (B)	Rapport de rythme (W)	Temps d'expansion des feuilles (Te)	Temps de fonctionnement des feuilles (Tf)	Phyllochrone
<i>Khaya senegalensis</i>	Daloo (N = 27 ; T = 30)	0,36±0,15 a	10±6,02 a	1,54±0,95 b	0,6±0,4 b	0,62±0,23 b	0,84±0,34 a	0,43±0,12 b	15,85±7,3 a	26,6±7,67 a	0,173±0,02 a
	Korhogo (N = 18 ; T = 30)	0,28±0,11 a	4±2,23 b	5,11±3,54 a	0,91±0,45 a	0,89±0,44 a	0,74±0,42 a	0,92±0,55 a	7,1±3,12 b	15,8±2,2 b	0,078±0,01 b
	Pr>F	0,852	0,001	0,009	0,002	0,043	0,594	0,006	0,001	0,0001	0,0024
<i>Pterocarpus erinaceus</i>	Daloo (N = 20 ; T = 30)	0,22±0,19 a	8±5,11 a	0,54±0,23 b	0,45±0,14 a	0,93±0,57 a	0,72±0,41 b	0,51±0,32 a	9,5±5,02 a	15,95±8,01 a	0,094±0,04 a
	Korhogo (N = 25 ; T = 30)	0,23±0,2 a	5±3,02 b	1,19±0,72 a	0,24±0,11 b	0,69±0,44 b	1±0,65 a	0,21±0,12 b	5,2±2,53 b	7,26±3,55 b	0,067±0,03 a
	Pr>F	0,902	0,011	0,003	0,01	0,026	0,015	0,006	0,012	0,001	0,0512
<i>Parkia biglobosa</i>	Daloo (N = 20 ; T = 30)	0,19±0,05 a	6±3,03 a	2,39±1,42 a	0,5±0,2 a	0,83±0,37 a	0,98±0,35 a	0,41±0,11 a	5,5±2,12 a	16,5±4,41 a	0,067±0,01 a
	Korhogo (N = 22 ; T = 30)	0,16±0,06 a	5±2,14 a	0,76±0,31 b	0,38±0,14 b	0,51±0,23 b	1±0,43 a	0,35±0,1 a	4,4±1,27 a	8,33±2,51 b	0,054±0,02 a
	Pr>F	0,687	0,036	0,001	0,018	0,011	0,867	0,163	0,082	0,023	0,743

Les valeurs portant les mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %

7.3.1.2.2. Paramètres du développement calculés au niveau de l'UC

La figure 72 donne les paramètres de développement (P_{Cime} , B et W) calculés à partir de l'analyse de cime des individus de 2 ans, ainsi que les probabilités de la tige ($P_{distribution}$: à partir de la binomiale du fonctionnement des méristèmes et $P_{Bernoulli}$: à partir de la pente d'équation de droite des processus de Bernoulli dans les tiges des individus de 1 et 2 ans).

Chez *Khaya senegalensis*, le paramètre $P_{Bernoulli}$ a été de 0,71 à Daloa contre 0,82 à Korhogo, le paramètre de $P_{distribution}$ a été de 0,78 à Daloa contre 0,47 à Korhogo, le paramètre P_{Cime} a été de 0,6 à Daloa contre 0,91 à Korhogo, le paramètre B a été de 0,84 à Daloa contre 0,74 à Korhogo et le paramètre W a été de 1 à Daloa et à Korhogo Figure 72a.

Chez *Pterocarpus erinaceus*, le paramètre $P_{Bernoulli}$ a été de 0,9 à Daloa contre 0,81 à Korhogo, le paramètre de $P_{distribution}$ a été de 0,57 à Daloa contre 0,41 à Korhogo, le paramètre P_{Cime} a été de 0,45 à Daloa contre 0,24 à Korhogo, le paramètre B a été de 0,72 à Daloa contre 1 à Korhogo et le paramètre W a été également de 1 à Daloa et à Korhogo Figure 72b.

Chez *Parkia biglobosa*, le paramètre $P_{Bernoulli}$ a été de 0,74 à Daloa contre 0,82 à Korhogo, le paramètre de $P_{distribution}$ a été de 0,57 à Daloa contre 0,9 à Korhogo, le paramètre P_{Cime} a été de 0,5 à Daloa contre 0,38 à Korhogo, le paramètre B a été de 0,98 à Daloa contre 1 à Korhogo et le paramètre W a été également de 1 à Daloa et à Korhogo Figure 72c.

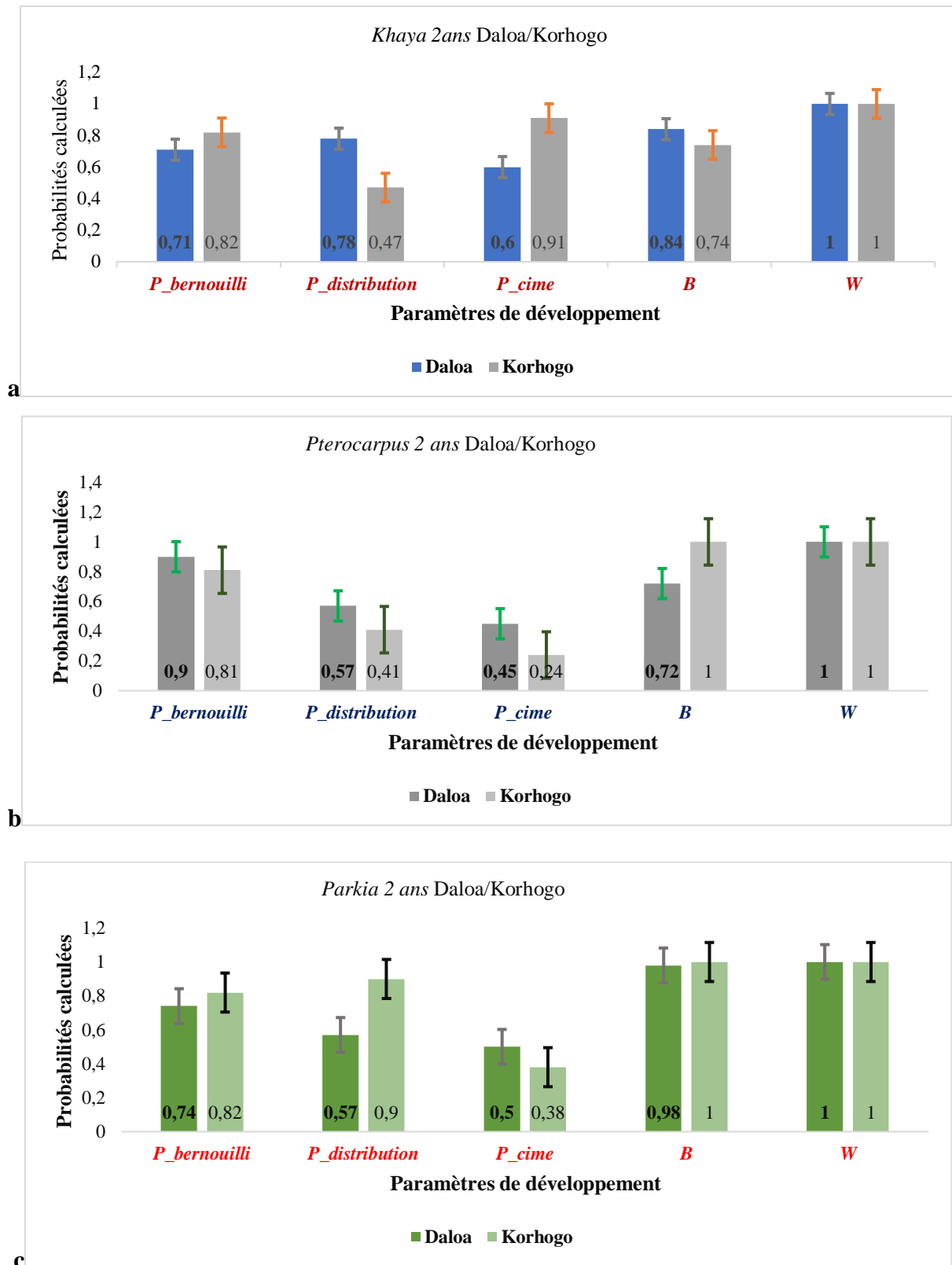


Figure 72 : histogrammes de probabilités de développement topologique des individus de 2 ans selon l'analyse de cime au niveau de l'UC

Probabilités de développement chez *Khaya senegalensis* (a), *Pterocarpus erinaceus* (b) et *Parkia biglobosa* (c)

7.3.1.3. Simulation du développement topologique des espèces cibles à 2 ans

Les ajustements des paramètres de développement calculés plus haut, et implémentés dans Matlab ont permis de visualiser le développement (la structure) topologique et architectural des plants âgés de 2 ans. Parmi des structures potentielles d'arbres simulées par le modèle GreenLab, quelques unes sont présentées par la figure 73 pour chacune des espèces.

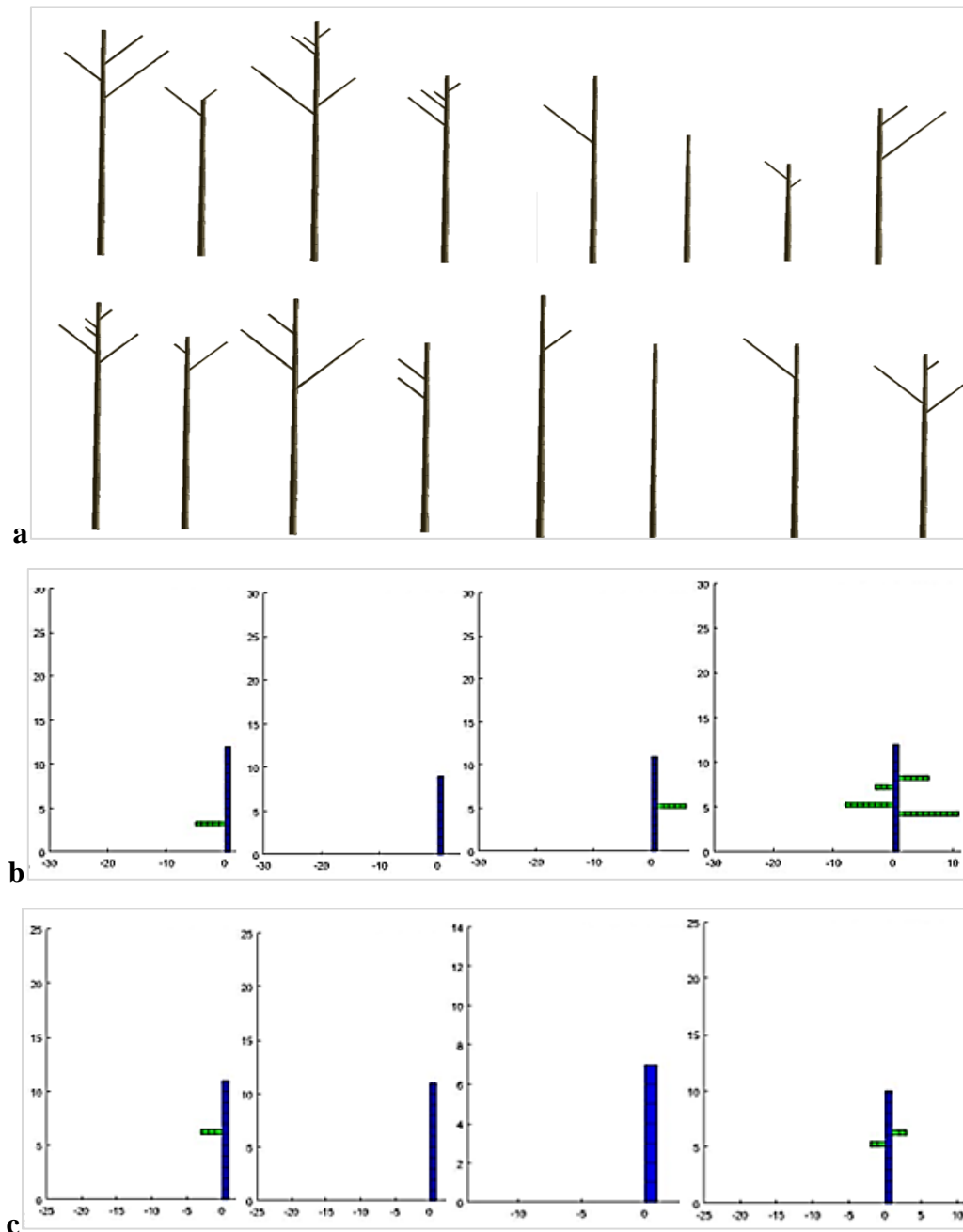


Figure 73 : simulation topologique de structures potentielles chez les individus de 2 ans

Structures potentielles chez *Khaya senegalensis* (a), *Pterocarpus erinaceus* (b) et *Parkia biglobosa* (c). Le modèle produit du bruit et les structures montrent un aspect stochastique de développement ; les branches s'établissent après un an de développement. L'espèce *Parkia biglobosa* présente moins de plants branchés que chez les deux autres espèces

7.3.2. Modèles de croissance des espèces cibles

7.3.2.1. Modèles allométriques

7.3.2.1.1. Caractéristiques des individus échantillonnés

Le tableau 34 présente les caractéristiques dendrométriques ainsi que le nombre d'entités botanique prélevé dans l'architecture des individus pour l'établissement des équations allométriques. Au total, 156 individus ont été échantillonnés par espèce pour l'ensemble des stades de développement. Chez *Khaya senegalensis*, les hauteurs ont varié de 0,8 à 3,51 m, les diamètres au collet ont varié de 4,1 à 11,02 cm. Le nombre d'entreoeud échantiollonné sur le tronc (A1) a varié de 307 à 1024, tandis que ce nombre a varié de 0 à 150 sur les branches (A2). Le nombre de feuille prélevée a varié de 262 à 522 sur le tronc et de 0 à 118 sur les branches.

Chez *Pterocarpus erinaceus*, les hauteurs ont varié de 0,53 à 2,63 m, les diamètres au collet ont varié de 2,4 à 7,33 cm. Le nombre d'entreoeud échantiollonné sur le tronc (A1) a varié de 312 à 672, ce nombre a varié de 103 à 261 sur les branches (A2). Le nombre de feuille prélevée a varié de 258 à 374 sur le tronc et de 72 à 179 sur les branches.

Chez *Parkia biglobosa*, les hauteurs ont varié de 0,65 à 1,57 m, les diamètres au collet ont varié de 3,38 à 8,71 cm. Le nombre d'entreoeud échantiollonné sur le tronc (A1) a varié de 390 à 541 sur le tronc (A1) et de 0 à 108 sur les branches (A2). Le nombre de feuille prélevée a varié de 137 à 269 sur le tronc et de 0 à 53 sur les branches.

Tableau 34 : caractéristiques dendrométriques et nombre d'entité échantillonné par catégorie d'axe et par âge chez les espèces cibles.

Espèces	Âges	Nombre d'arbre	Hauteur totale (m)	Diamètre basal (cm)	Forme des feuilles	Catégories d'axes et nombre d'organes			
						Nombre d'entrenœuds		Nombre de feuilles	
						A1	A2	A1	A2
<i>Khaya senegalensis</i>	6 mois	60	0,8±0,02c	4,1±0,07b	Simple et Composées imparipennées (1 à 7 folioles)	307	0	262	0
	12 mois	60	1,77±0,05b	7,4±0,01ab	Composées paripennées (6 à 18 folioles)	1024	117	612	89
	24 mois	36	3,51±0,12a	11,02±0,12a	Composées paripennées (8 à 24 folioles)	871	150		118
<i>Pterocarpus erinaceus</i>	6 mois	60	0,53±0,07c	2,4±0,01c	Composées simples et imparipennées (1 à 11 folioles)	312	103	285	86
	12 mois	60	0,95±0,04b	5,7±0,03b	Composées paripennées (6 à 12 folioles)	672	261	374	179
	24 mois	36	2,63±0,1a	7,33±0,13a	Composées paripennées (10 à 18 folioles)	474	127	258	72
<i>Parkia biglobosa</i>	6 mois	60	0,67±0,03b	3,38±0,04b	Composées bipennées (3 à 6 folioles et 18 à 26 foliollules)	441	0	137	0
	12 mois	60	1,12±0,11a	6,1±0,02ab	Composées bipennées (6 à 20 folioles et 18 à 30 foliollules)	541	97	269	38
	24 mois	36	1,57±0,09a	8,71±0,11a	Composées bipennées (6 à 24 folioles et 18 à 30 foliollules)	390	108	163	53

a, b et c: comparaison à l'aide des tests de Student-Newman-Keuls ; les lettres différentes sur deux lignes impliquent une différence significative au seuil de 5%.

7.3.2.1.2. Biomasse sèche des entrenœuds estimées à partir du volume

Les régressions linéaires, les modèles logarithmiques et les modèles de puissance entre la biomasse sèche et le volume des entrenœuds pour les trois espèces sont présentés par la figure 74. Ces figures montrent une forte corrélation ($r = 0,83-0,99$) entre la biomasse sèche des entrenœuds (*IDM*) et le volume des entrenœuds (*VL*) chez *Khaya senegalensis* (Figure 74a et 74a1),

une forte corrélation ($r = 0,91-0,98$) entre la biomasse sèche (*IDM*) et le volume des entrenœuds (*VL*) chez *Pterocarpus erinaceus* (Figure 74b et 74b1) et une forte corrélation ($r = 0,85-0,99$) entre la biomasse (*IDM*) et le volume inter-nodulaire (*VL*) chez *Parkia biglobosa* (Figure 74c et 74c1). Dans les modèles d'estimation de la biomasse sèche (*IDM*), les régressions étaient significatives ($P = 0,0001$, $R^2 = 0,81-0,98$, $IDM = 0,45*VL+0,02$ et $IDM = 0,4*Ln[VL]+0,83$) chez *Khaya senegalensis* (Figure 74a et 74a1). Ces modèles étaient également significatifs chez *Pterocarpus erinaceus* ($P = 0,0001$, $R^2 = 0,78-0,94$, $IDM = 0,33*VL+0,38$ et $IDM = 1,15*[VL]^{0,26}$) (Figure 74b et 74b1) et chez *Parkia biglobosa* ($P = 0,0001$, $R^2 = 0,73-0,96$, $IDM = 0,47*VL+0,44$ et $IDM = 1,45*[VL]^{0,39}$) (Figure 74c et 74c1).

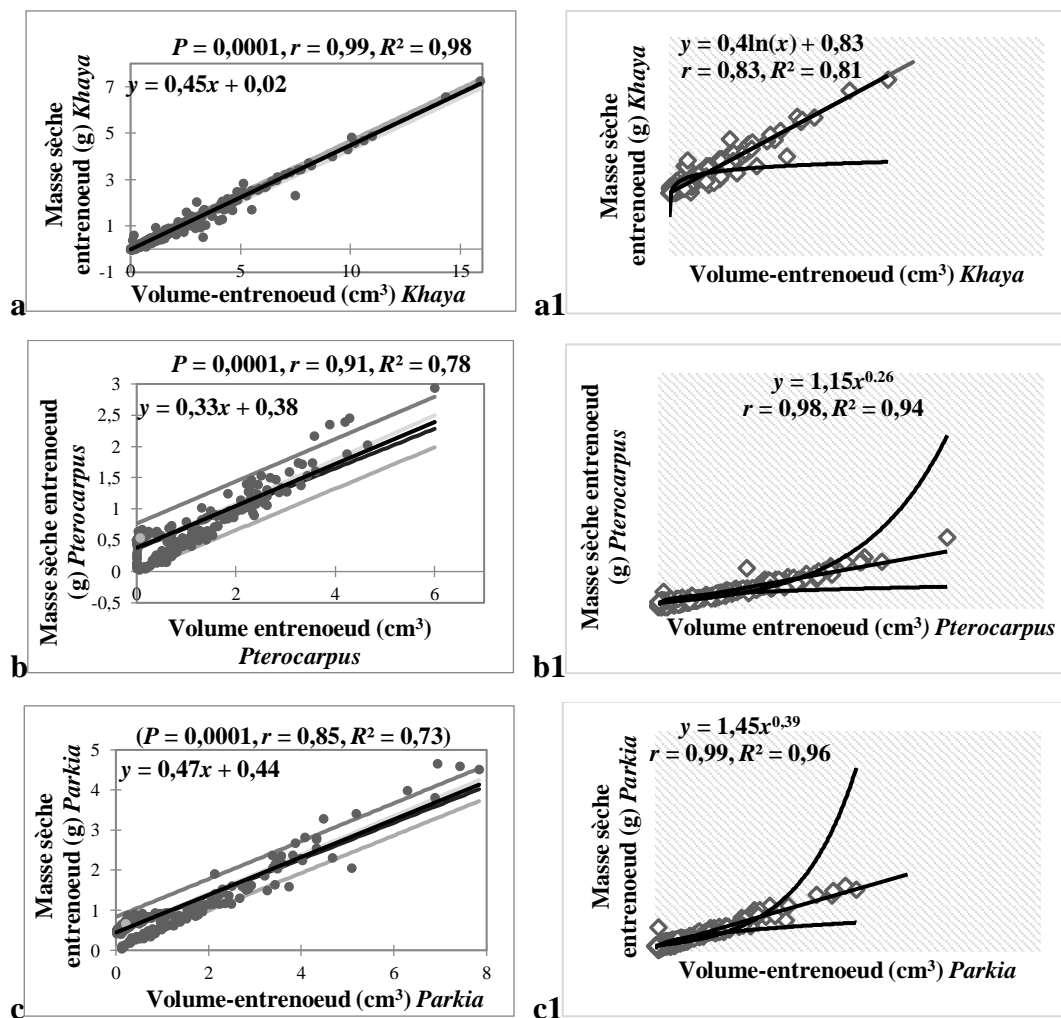


Figure 74 : modèles allométriques estimant la biomasse sèche des tiges à partir du volumes des entrenœuds chez les espèces cibles

Relation et régressions linéaires (a) puis modèle logarithmique (a1) entre la biomasse sèche et les volumes des entrenœuds chez *Khaya senegalensis* ; relation et régressions linéaires (b) puis modèle de puissance (b1) entre la biomasse sèche et les volumes d'entrenœud chez *Pterocarpus erinaceus*, puis régressions linéaires (c) puis modèle de puissance (c1) entre la biomasse sèche et les volumes des entrenœuds chez *Parkia biglobosa*. Données observées ou actifs (points gris), estimé ou modèle (ligne pleine) et intervalle de confiance à 95% (ligne pointillée et ligne pleine).

7.3.2.1.3. Biomasse sèche des feuilles estimée à partir du produit de leurs dimensions

Les corrélations, la régression linéaire et les modèles polynomiaux entre la biomasse sèche des feuilles et le produit des dimensions des feuilles sont présentés dans la figure 75, 76 et 77. La plupart des meilleurs modèles obtenus sont des modèles polynomiaux avec une transformation logarithmique des données. Le collecteur pourra faire ses propres choix selon ses préférences pendant les collectes.

Les figures 75a, 75a1, 75b, 75b1, 75c et 75c1 montrent respectivement les modèles de régression linéaire ainsi que leurs modèles polynomiaux successifs obtenus entre la biomasse foliaire sèche et le produit des dimensions des feuilles chez *Khaya senegalensis*. Les régressions permettant l'estimation de la masse sèche foliaire (*LDM*) chez *Khaya senegalensis* ont été toutes significatives ($P = 0,0001$; $R^2 = 0,80-0,95$; $LDM = 0,004 * NLt * LLtL * LLtW + 0,07$ et $LOG [LDM] = 1,07 * LOG [NLt * LLtL * LLtW] - 2,74$, puis $P = 0,0001$; $R^2 = 0,78-0,88$; $LDM = 0,001 * RCL * LLtL * LLtW + 0,19$ et $LOG [LDM] = 0,75 * LOG [RCL * LLtL * LLtW] - 2,14$ enfin $P = 0,0001$, $R^2 = 0,79-0,92$, $LDM = 0,89 * NLt * LLtL * LLtW + 0,3$ et $LOG [LDM] = 0,89 * LOG [NLt * LLtL * LLtW] + 0,01$).

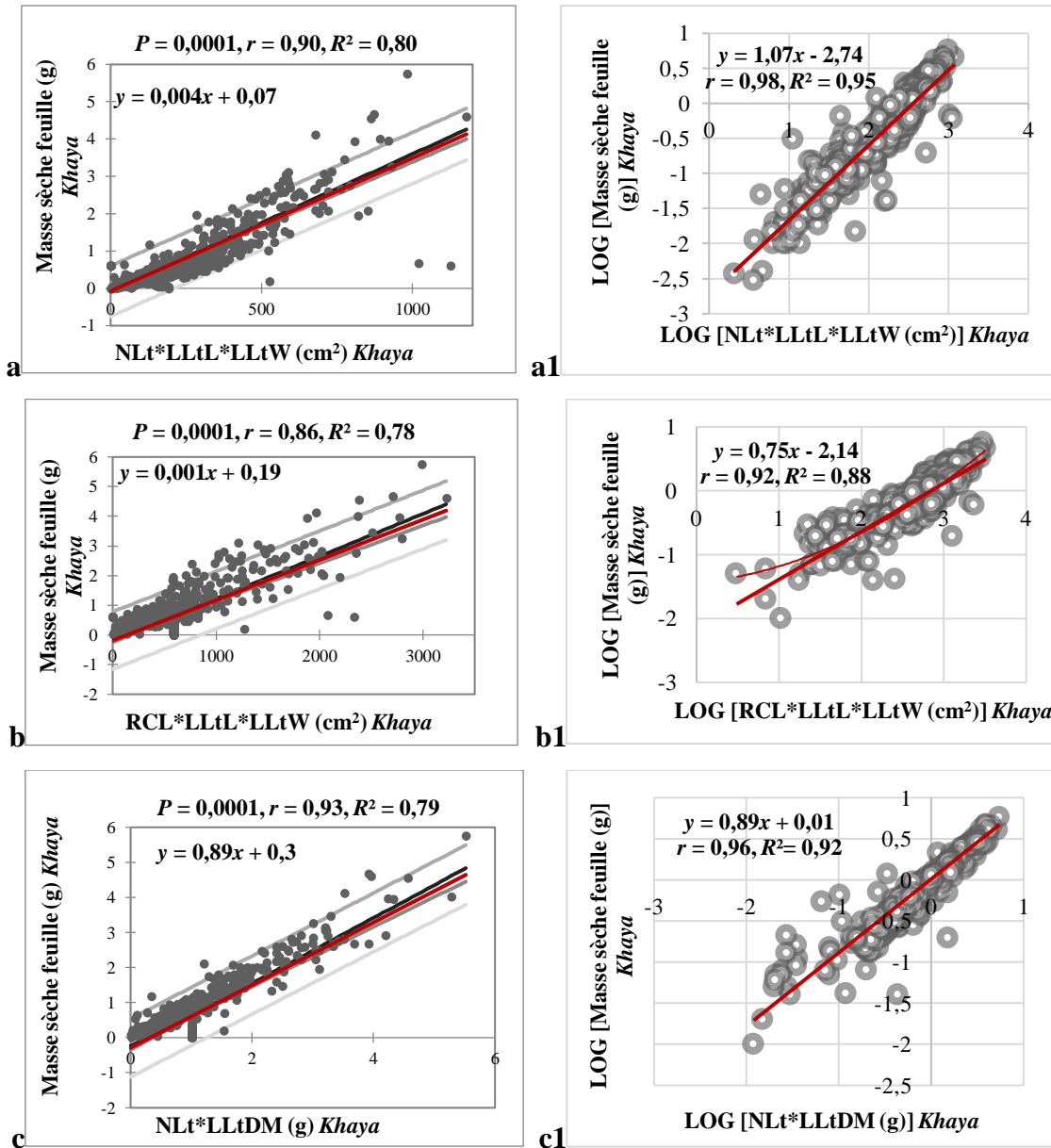


Figure 75 : modèles allométriques estimant la biomasse sèche des feuilles à partir du produit de leurs dimensions chez *Khaya senegalensis*.

Relation et régressions linéaires entre la biomasse des feuilles sèches et le produit du nombre de folioles primaires par la longueur de la plus grande foliole primaire et la largeur de la plus grande foliole primaire (a), puis le produit de la longueur du rachis foliaire par la longueur de la plus grande foliole primaire par la largeur de la plus grande foliole primaire (b) et le produit du nombre de folioles primaires par la masse sèche de la plus grande foliole primaire (c) ainsi que leur régression linéaire respective avec une transformation logarithmique des données (a1 ; b1 et c1) chez *Khaya senegalensis*

Chez *Pterocarpus erinaceus*, les figures 76a, 76a1, 76b et 76b1 montrent une forte corrélation entre la biomasse sèche des feuilles (*LDM*) et le produit du nombre de folioles primaires (*NLt*) par la longueur de la plus grande foliole primaire (*LLtL*) et la largeur de la plus grande foliole primaire (*LLtW*) ($r = 0,90-0,96$) ; puis entre la biomasse sèche (*LDM*) et le produit de la longueur du rachis (*RCL*) par la longueur de la plus grande foliole primaire (*LLtL*) par la

largeur de la plus grande foliole primaire ($LLtW$) ($r = 0,83-0,99$). Chez *Pterocarpus erinaceus*, les régressions estimant la biomasse sèche étaient toutes significatives ($P = 0,0001$; $R^2 = 0,80-0,92$; $LOG [LDM] = 0,4*LOG [NLt*LLtL*LLtW]-0,64$ et $LOG [LDM] = 0,12*(LOG [NLt*LLtL*LLtW])^2-0,004*LOG [NLt*LLtL*LLtW]-0,35$, puis $P = 0,0001$; $R^2 = 0,75-0,98$, $LDM = 0,15*[RCL*LLtL*LLtW]+0,14$ et $LOG [LDM] = 0,71*LOG [RCL*LLtL*LLtW]-1,64$).

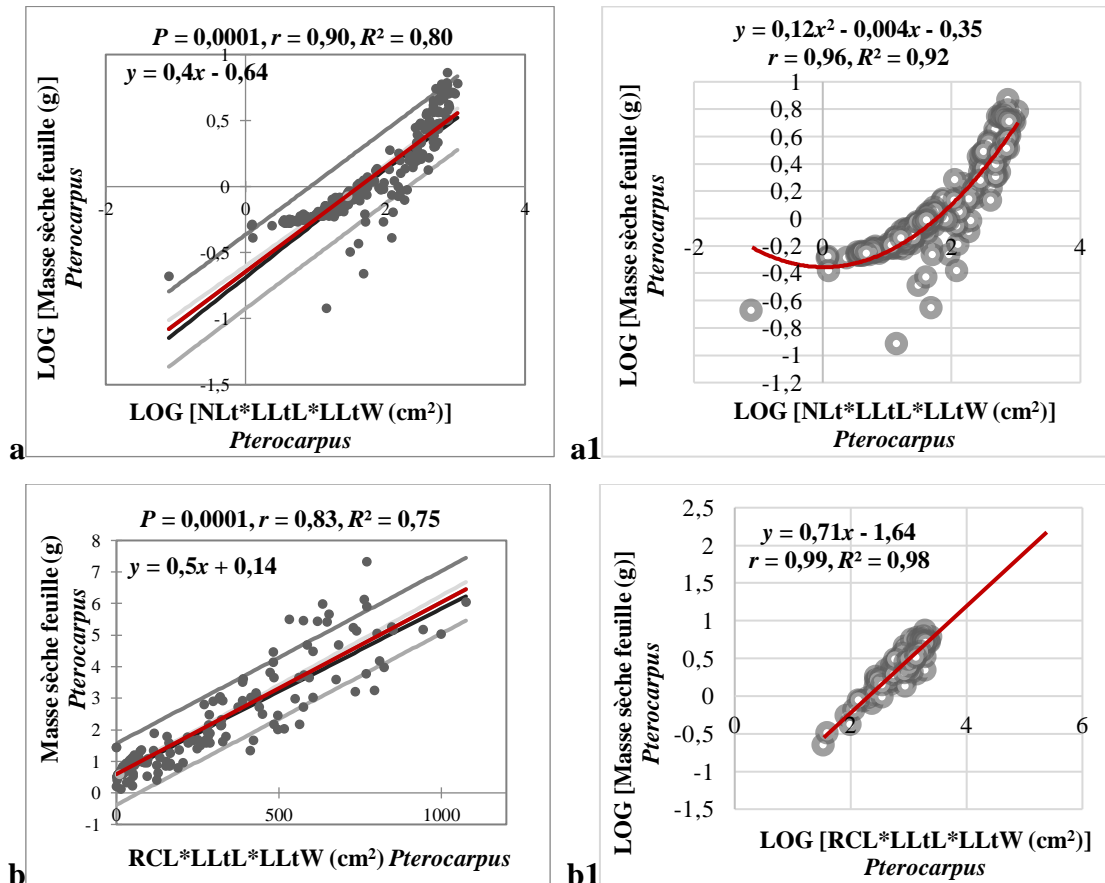


Figure 76 : modèles allométriques estimant la biomasse sèche des feuilles à partir du produit de leurs dimensions chez *Pterocarpus erinaceus*.

Relation et régression linéaire (a) et le modèle polynomial (a1) entre la biomasse des feuilles sèches et le produit logarithmique du nombre de folioles primaires et de la longueur de la foliole primaire la plus grande et de la largeur de la foliole primaire la plus grande, puis les régressions linéaires entre la biomasse des feuilles sèches puis le produit de la longueur du rachis foliaire par la longueur de la plus grande foliole primaire par la largeur de la plus grande foliole primaire (b) ainsi qu’une régression avec transformation logarithmique des données (b1) chez *Pterocarpus erinaceus*

Chez *Parkia biglobosa*, les figures 77a, 77a1, 77b et 77b1 donnent respectivement les modèles de régression linéaire ainsi que leurs modèles polynomiaux successifs obtenus entre la biomasse sèche des feuilles et le produit de la dimension des feuilles, des folioles primaires et des folioles secondaires. Les résultats ont montré que, l’estimation de la masse foliaire sèche (LDM) par les régressions était significative chez *Parkia biglobosa* ($P = 0,0001$; $R^2 = 0,84-0,96$; $LDM = 0,012*NSeLt*LSeLtL*LSeLtW*NLt+0,06$ et $LOG [MLD] = 0,23*(LOG$

$[NSeLt * LSeLtL * LSeLtW * NLt]^2 - 0,4 * LOG [NSeLt * LSeLtL * LSeLtW * NLt] - 0,11$, puis $P = 0,0001$; $R^2 = 0,80-0,97$, $LDM = 0,016 * NLt * LLtL * LLtW + 0,3$ et $LOG [LDM] = 0,3 * (LOG [NLt * LLtL * LLtW])^2 - 0,65 * LOG [NLt * LLtL * LLtW] + 0,1$.

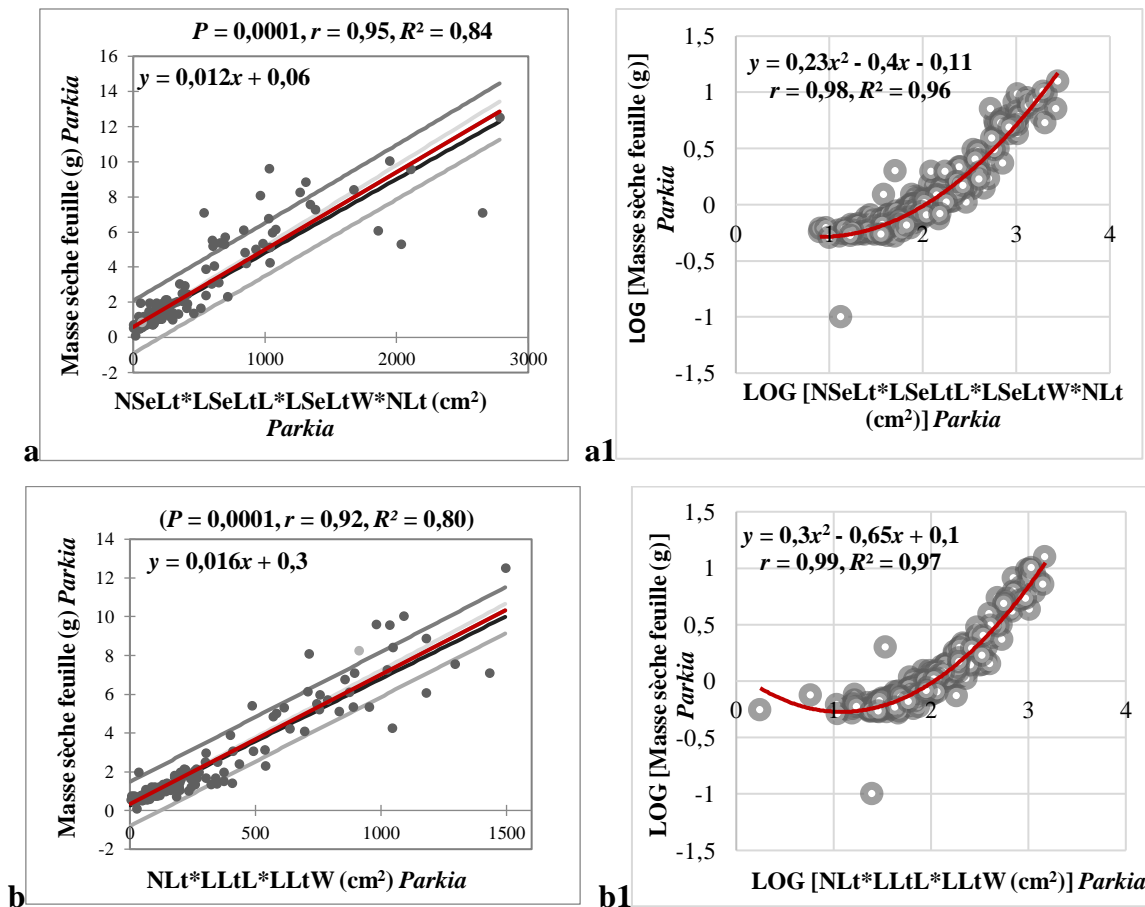


Figure 77 : modèles allométriques estimant la biomasse sèche des feuilles à partir du produit de leurs dimensions chez *Parkia biglobosa*.

Relation et régression linéaire avec les données normales (a et b) puis des modèles polynomiaux avec une transformation logarithmique des données (a1 et b1) entre la biomasse sèche foliaire et le produit du nombre de folioles secondaires par la longueur de la plus grande foliole secondaire par la largeur de la plus grande foliole secondaire par le nombre de folioles primaires (a et a1) puis le produit du nombre de folioles primaires par la longueur de la plus grande foliole primaire par la largeur de la plus grande foliole primaire (b et b1) chez *Parkia biglobosa*

7.3.2.1.4. Surface foliaire estimée à partir du produit des dimensions des feuilles

Les relations, la régression linéaire, les modèles polynomiaux et de puissance entre la surface foliaire et le produit des dimensions foliaires sont présentés dans la figure 73. Chez *Parkia biglobosa*, les résultats ont montré une forte corrélation et de bons modèles de puissance avec les données transformées en fonction logarithmique par rapport aux données non transformées (Figure 78c1 et 78d1). Les résultats ont montré une régression linéaire significative pour la surface foliaire estimée (*LA*) chez *Khaya senegalensis* ($P = 0,0001$; $R^2 =$

0,92-0,94 ; $LOG [LA] = 0,83*LOG [NLt*LLtL*LLtW]$ et $LOG [LA] = 0,08*(LOG [NLt*LLtL*LLtW])^2+1,13*LOG [NLt*LLtL*LLtW]-0,27$). Pour la surface foliaire estimée (LA) chez *Pterocarpus erinaceus*, les régressions étaient également significatives ($P = 0,0001$; $R^2 = 0,95-0,96$; $LOG [LA] = 0,74*[NLt*LLtL*LLtW]+0,15$ et $LOG [LA] = 0,03*(LOG [NLt*LLtL*LLtW])^2 +0,65*LOG [NLt*LLtL*LLtW]+0,23$). Les régressions pour la surface foliaire (LA) estimée chez *Parkia biglobosa* étaient également significatives ($P = 0,0001$; $R^2 = 0,91-0,99$, $LA = 0,13*NSeLt*LSeLtL*LSeLtW*NLt+14,64$ et $LOG [LA] = 0,18*LOG [NSeLt*LSeLtL*LSeLtW*NLt]^{0,65}$, puis $P = 0,0001$, $R^2 = 0,7-0,88$, $LA = 0,22*NLt*LLtL*LLtW+3,63$ et $LOG [LA] = 1,6*(LOG [NLt*LLtL*LLtW])^{0,58}$).

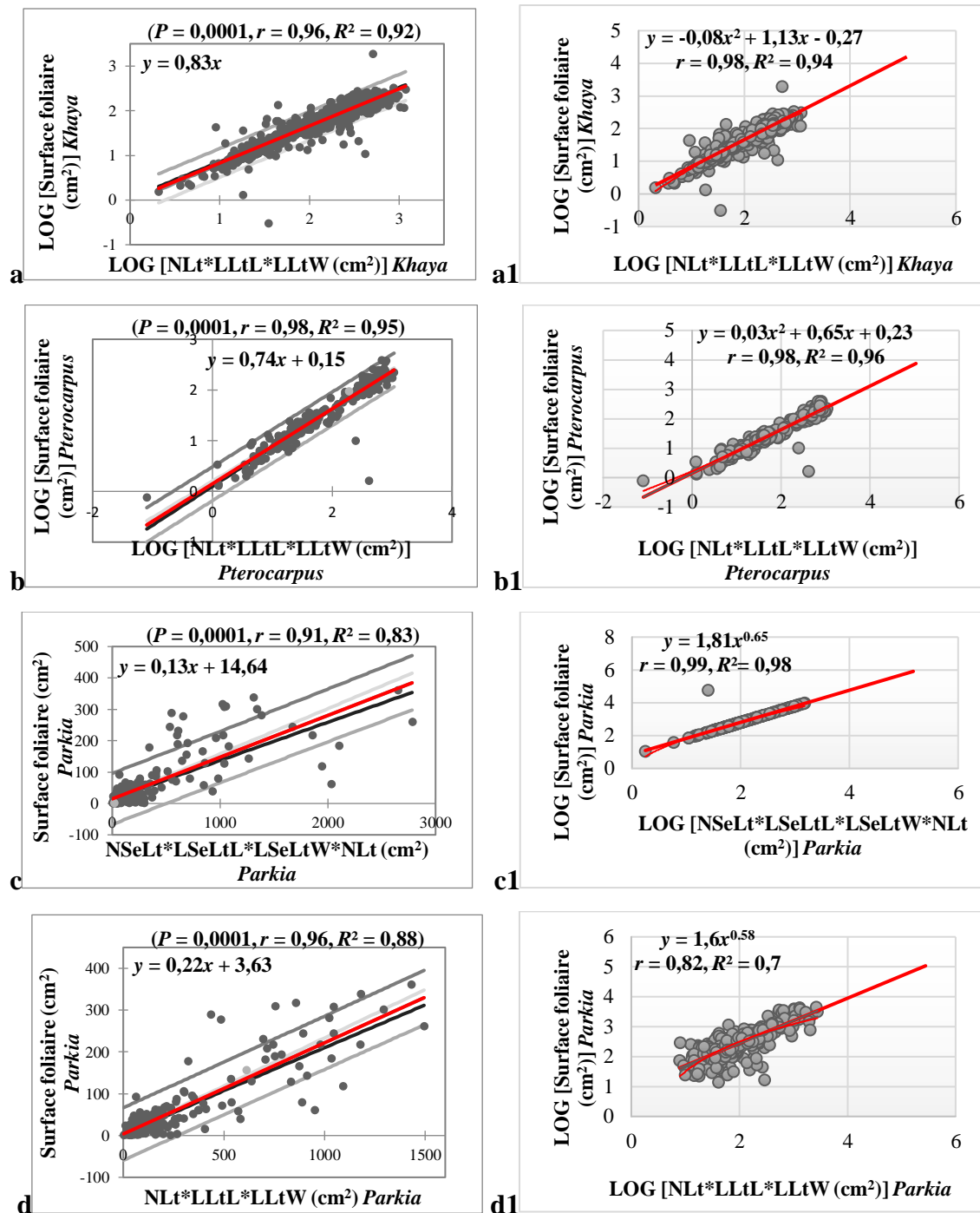


Figure 78 : modèles allométriques estimant la surface foliaire à partir des dimensions des feuilles chez les trois espèces cibles

Relation et régression linéaire (a) puis modèle polynomial (a1) entre la surface foliaire et le produit logarithmique des dimensions foliaires chez *Khaya senegalensis*. Les modèles linéaire (b) puis polynomial (b1) entre la surface foliaire et le produit logarithmique des dimensions des feuilles chez *Pterocarpus erinaceus*. Enfin la régression linéaire avec les données normales (c et d) ainsi que leur modèle de puissance respectif avec une transformation logarithmique des données (c1 et d1) entre la surface foliaire et le produit des dimensions foliaires chez *Parkia biglobosa*. Données mesurés ou actif (points), estimé ou modèle (ligne continue) et intervalle de confiance à 95% (ligne pointillée et ligne continue).

7.3.2.2. Calibration du modèle de croissance des espèces cibles

7.3.2.2.1. Paramètres obtenus empiriquement (observation) et expérimentalement

L'épaisseur de la feuille ε (*SLW*) est estimée à 0,013g/cm², 0,016g/cm² et 0,014g/cm² en poids sec, respectivement chez *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* et *Parkia biglobosa*. Le coefficient d'extinction de la lumière k , qui intervient dans la loi de Beer est fixé à 1 et l'efficacité environnementale est également fixé à $E_0 = 1$ (Pas de déficit de lumière et d'eau) car nous sommes en zone tropicale. La Surface S_p est très grande car les plants sont isolés et en croissance libre. Le paramètre lambda (λ) qui contrôle la loi de *Pressler* est fixé à 1. L'offre ou gain dû à l'activité photosynthétique (Q) est exprimée en grammes, la demande n'a pas de dimension car les puits sont relatifs. La valeur 1 est donnée aux puits d'âge physiologique 2 (branches). Quant au rapport offre-demande (Q/D), il indique la pression trophique et est exprimé en gramme.

7.3.2.2.2. Croissance chez les arbres de six (6) mois

Avant 6 mois, les unités de croissance ne sont pas bien perceptibles. Les axes ont une croissance continue phytomère par phytomère. Le pas de temps de croissance est exprimé en cycle de développement (CD). Chez *Khaya senegalensis*, le temps de fonctionnement des feuilles est de 27 CD, car au-delà de 27 phytomères à partir du sommet, les feuilles jaunissent. Le temps d'expansion est estimé à 16 CD, car au-delà de 16 phytomères, les feuilles arrêtent leur expansion. Chez *Pterocarpus erinaceus*, le temps de fonctionnement des feuilles est de 16 CD, au-delà de 16 phytomères à partir du sommet, les feuilles jaunissent. Le temps d'expansion est estimé à 10 CD, au-delà de 10 phytomères, les feuilles arrêtent leur expansion. Chez *Parkia biglobosa*, le temps de fonctionnement des feuilles est de 14 CD, au-delà de 14 phytomères à partir du sommet, les feuilles jaunissent. Le temps d'expansion est estimé à 6 CD, au-delà de 6 phytomères, les feuilles arrêtent leur expansion.

Ici la surface de production S_p est supposée très grande car les plants sont en croissance libre (isolés). Cette valeur peut prendre une valeur définie quand l'âge des plants augmente. Le recouvrement des feuilles les unes sur les autres diminue la surface foliaire active, ce qui limite la croissance.

7.3.2.2.1. Expression des paramètres source-puits

A 6 mois, les plants ne ramifient pas, ils sont donc décrits par un seul âge physiologique (tronc). Les mesures sont effectuées au niveau du phytomère (poids des feuilles et des entrenœuds). Les 30 arbres sélectionnés par espèce ont le même âge. Les tiges ont une croissance continue. Les fonctions de variation de puits (Figure 79) s'ajustent à une loi bêta de paramètres a et b . Cette loi peut être retrouvée (recalculable) par méthode inverse (inversion du modèle via la méthode des moindres carrées) à partir du poids des organes échantillonnés, sans suivre la croissance des plants analysés par la méthode des séries organiques. Les formes de variation des puits d'organe de la figure 79 montrent les durées d'expansion (initiation de croissance à la maturation) des types d'organes sur un temps d'évolution, exprimé en cycle de croissance ou de développement (CD). Ces fonctions de variation de puits sont contrôlées par des couples de paramètre a et b .

Chez *Khaya senegalensis*, la fonction de force de puits des feuilles suit une loi bêta de forme symétrique en cloche et de paramètre $a=b=2$. Cette loi est discrétisée et normalisée sur un intervalle T_0 de 14 CDs (Figure 79a). Les organes feuilles croissent exponentiellement jusqu'à 8 CDs ; l'expansion et le fonctionnement s'arrête (fin de compétition et de captation de biomasse dans le pool commun) et la force de puits décroît jusqu'au 14^{ième} cycle ; s'ensuit la mort des feuilles (jaunissement). Quant aux entrenœuds, la forme de la fonction de puits est asymétrique avec une courbe étalée ; le couple de paramètre a et b de la loi bêta vaut : (1, 2). La force de puit des entrenœuds décroît jusqu'au 14^{ième} cycle. Chez cette espèce les entrenœuds puisent le maximum de biomasse à leur naissance (apparition ou émission par le méristème), puis arrêt rapidement leur expansion sur 14 coups (Figure 79b).

Les notations (Titres, légendes et axes) chez *Khaya senegalensis* (Figure 79a et b) sont identiques aux figures relatives à *Pterocarpus erinaceus* (Figure 79a1 et b1) et *Parkia biglobosa* (Figure 79a2 et b2).

Chez *Pterocarpus erinaceus*, le phénomène est contraire. Les feuilles ont une fonction force de puits décroissance ; l'expansion et le fonctionnement s'arrête au 9^{ième} cycle (jaunissement des feuilles). La courbe est asymétrique et suit une loi bêta de paramètre $a=1$ et $b=2$. La force de fonction de puits des entrenœuds a une forme de fonction bêta symétrique de paramètre de couple a et b valant (1, 1) (Figure 79a1). La force de puits est exponentiel au début (jusqu'à 7 CDs) et décroît ensuite jusqu'au 9^{ième} cycle (Figure 79b1).

Chez *Parkia biglobosa*, la force de puis des organes feuilles et entrenœuds a une forme en cloche et symétrique avec des lois bêta de paramètre $a=b=1$. La force de puis des entrenœuds croît jusqu'au 6^{ième} cycle, se stationne jusqu'au 7^{ième} cycle puis décroît jusqu'au 9^{ième} cycle.

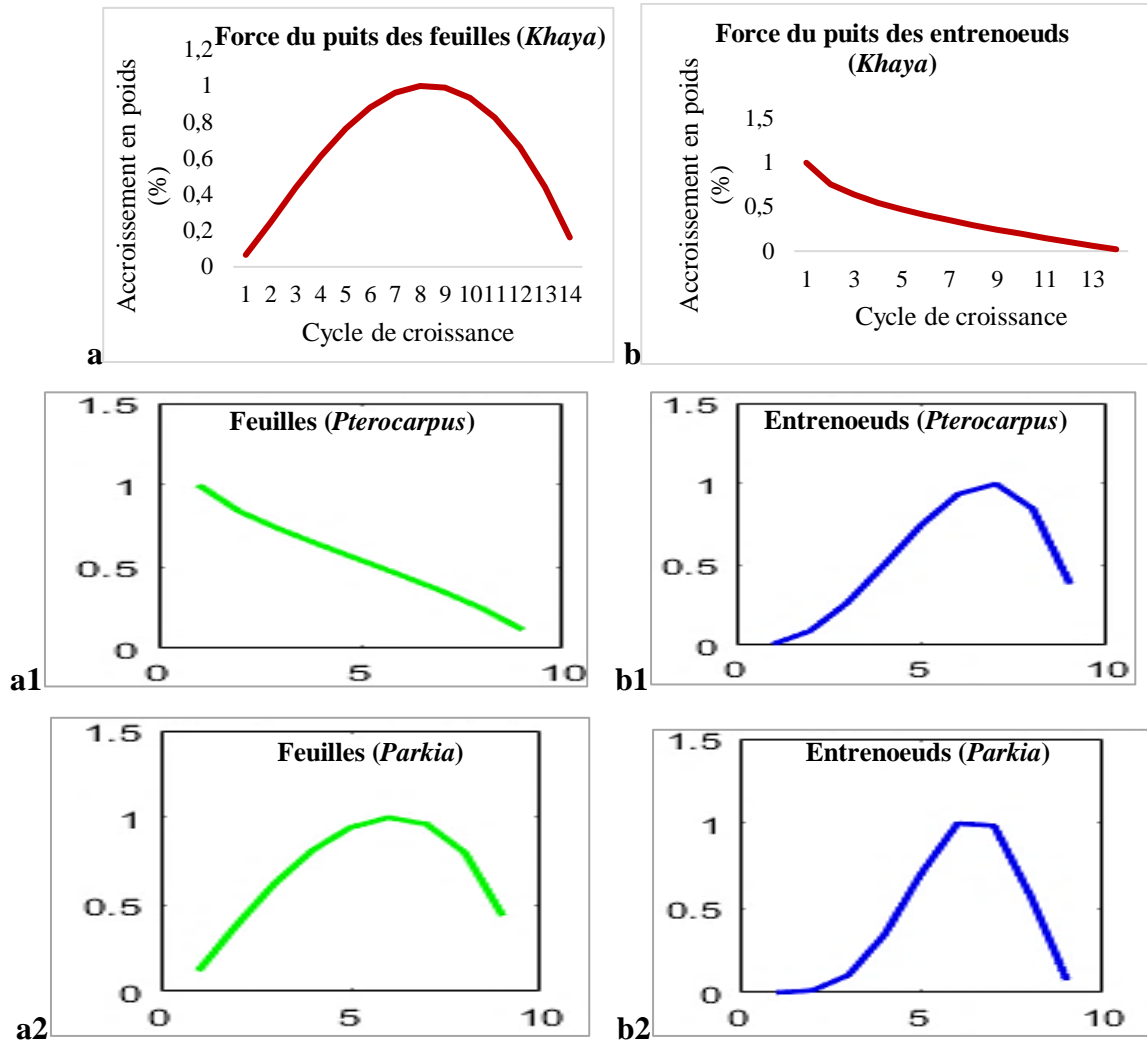


Figure 79 : fonction de variation du puits des organes feuilles et entrenœuds à 6 mois

Feuilles (a, a1 et a2) et des entrenœuds (b, b1 et b2) chez *Khaya senegalensis* (a et b), *Pterocarpus erinaceus* (a1 et b1) et *Parkia biglobosa* (a2 et b2)

Les séries organiques simples de feuilles et d'entrenœuds représentent 41 données, 25 données et 31 données respectivement chez *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* et *Parkia biglobosa*, ajustées par six paramètres.

La figure 80 indique que les séries organiques sont correctement ajustées par le modèle GreenLab. Les notations des titres, légendes et axes chez *Khaya senegalensis* (Figure 80a et b) sont les mêmes chez *Pterocarpus erinaceus* (Figure 80a1 et b1) et *Parkia biglobosa* (Figure 80a2 et b2).

Il n'est pas possible de calculer Sp , qui est fixé arbitrairement à une grande valeur (Tableau 35). Ce qui confirme bien qu'on est en croissance libre. La croissance des feuilles au départ est exponentielle, ce qui est en accord avec Sp très grand.

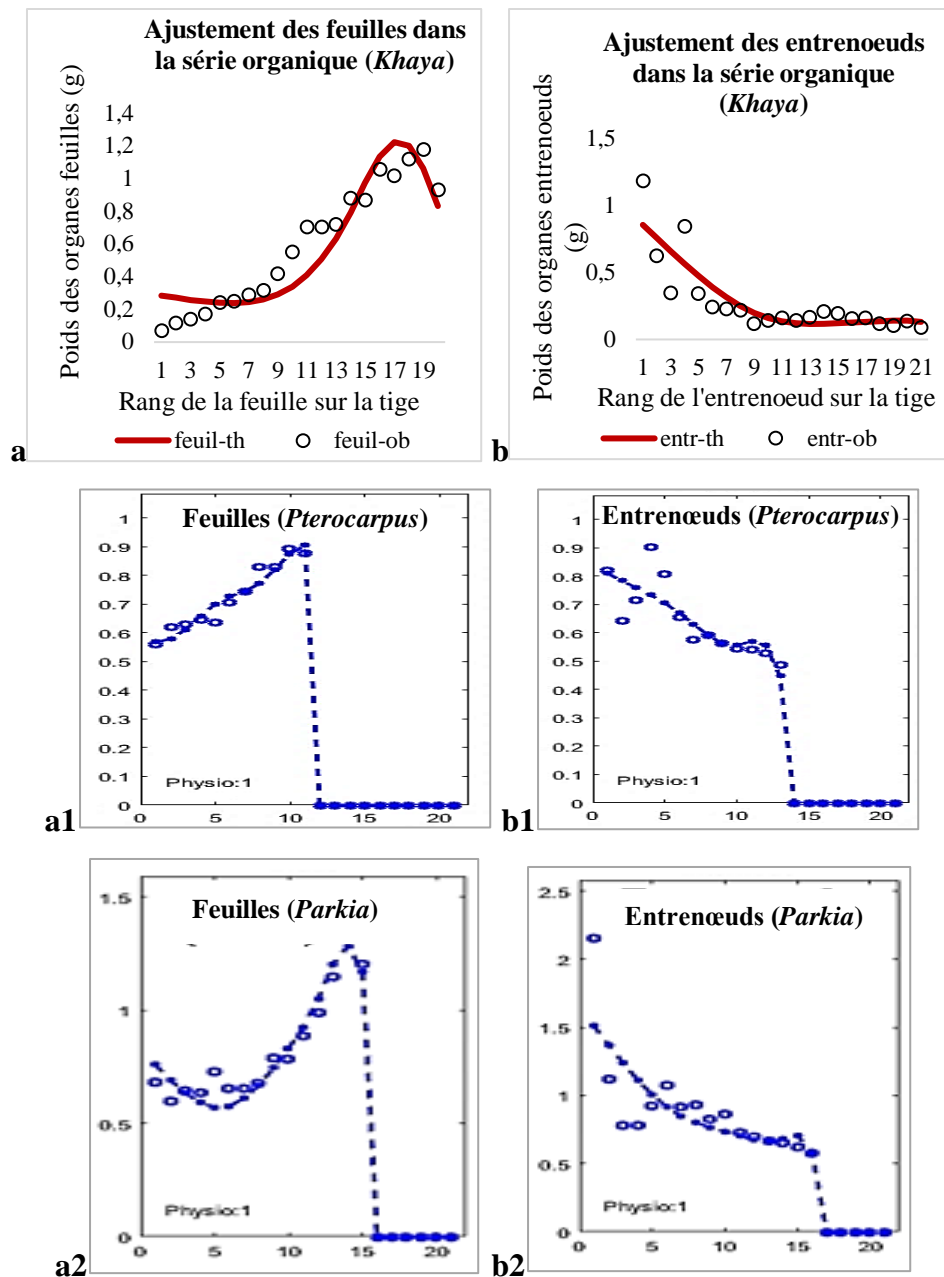


Figure 80 : ajustement des séries organiques observées (cercle) et calculées (ligne) des organes de la base au sommet de la tige

Feuilles (a, a1 et a2) et des entrenœuds (b, b1 et b2) chez *Khaya senegalensis* (a et b), *Pterocarpus erinaceus* (a1 et b1) et *Parkia biglobosa* (a2 et b2)

Le Tableau 35 donne les différents paramètres cachés calculés. Les seconds coefficients des lois bêta pour la variation des puits des feuilles ($Bb2$) et des entrenœuds ($Bi2$) sont fixés à 3. Les échantillons comprennent 30 cycles de développements par espèce ajustés par les

paramètres cachés (r , Q_0 , $Bb1$, Bil , Pc et Pil). Le coefficient de corrélation entre les paramètres calculés (théoriques) et observés est $R^2 = 0,89$ pour *Khaya senegalensis* ; $0,95$ pour *Pterocarpus erinaceus* et $0,96$ pour *Parkia biglobosa*. Les paramètres de variation des organes sont cohérents avec les observations.

Tableau 35: paramètres source-puits à 6 mois chez les espèces cibles

Espèces	r	Sp	Q_0	$Bb1$	Bil	Pc	α	Pil
<i>Khaya senegalensis</i>	401,9±47,77	100000	0,25±0,07	2,27±0,34	0,82±0,5	0,06±0,03	1	0,18±0,1
Cv -%	12	-	46	15	61	54	-	102
<i>Pterocarpus erinaceus</i>	94,48±10,23	100000	0,08±0,04	0,86±0,47	3,26±0,9	0,16±0,09	1	0,46±0,37
Cv -%	11	-	11	55	28	58	-	81
<i>Parkia biglobosa</i>	69,21±3,75	100000	0,21±0,17	2,14±0,29	5,75±3,1	0,19±0,05	1	0,7±0,13
Cv -%	5	-	23	14	54	28	-	19

r =résistance ou efficacité climatique ou de l'eau, SP =surface de production, Q_0 =biomasse initiale de la plante ou poids de la graine, $Bb1$ =lois bêta de la variation des feuilles ou expansion des feuilles, Bil = lois bêta de la variation des entrenœuds ou expansion des entrenœuds, Pc = puit des cernes, Pil = puit des entrenœuds.

Chez *Khaya senegalensis*, la forte valeur de $Bb1$ par rapport à Bil indique que les feuilles ont continué leur croissance pendant l'arrêt de croissance des entrenœuds. L'expansion des entrenœuds est rapide suivi d'un amortissement rapide, alors que ce phénomène est contraire chez les feuilles (lenteur). L'effet de l'arrêt du développement sur la taille des organes est illustré par la figure 80. Les dernières feuilles sont grandes, car elles ont continué à se développer après l'arrêt du fonctionnement du méristème. Les derniers entrenœuds formés restent petits à cause de la forme de la variation du puits, qui limite l'expansion. D'autre part, l'effet de la croissance secondaire est clair sur la croissance de l'entrenœud en fonction du rang du sommet. La valeur Q_0 (0,25 ; 0,08 et 0,21 respectivement chez *Khaya*, *Pterocarpus* et *Parkia*) calculés par le modèle est proche de la moyenne de graines semées en pépinière (0,20 g ; 0,07 g et 0,18 g respectivement chez *Khaya*, *Pterocarpus* et *Parkia*). Ce modèle arrive à prédire la biomasse de la graine à partir de donnée de terrain d'un arbre.

La figure 81 montre l'évolution des rapports « offre-demande » selon le rang des phytomères à 6 mois. Chez *Khaya senegalensis*, l'offre (Q) et le rapport offre-demande (Q/D) sont exponentiels et croissent de la base au sommet à cause de la fabrication d'organe le long de la tige (activités photosynthétique), alors que la demande (D) croit jusqu'à un certain niveau, se stabilise puis chute. Chez *Pterocarpus erinaceus*, la demande (D) croit au début puis chute au 20^{ième} cycles. Les individus ont commencé leur épanouissement à partir du 20^{ième} cycles et les organes ont eu du mal à être mis en place du 1^{er} au 20^{ième} cycle. Chez *Parkia biglobosa*, la

demande (D) croit au début puis chute au 20^{ème} cycles. Les individus ont commencé leur épanouissement après ce stade.

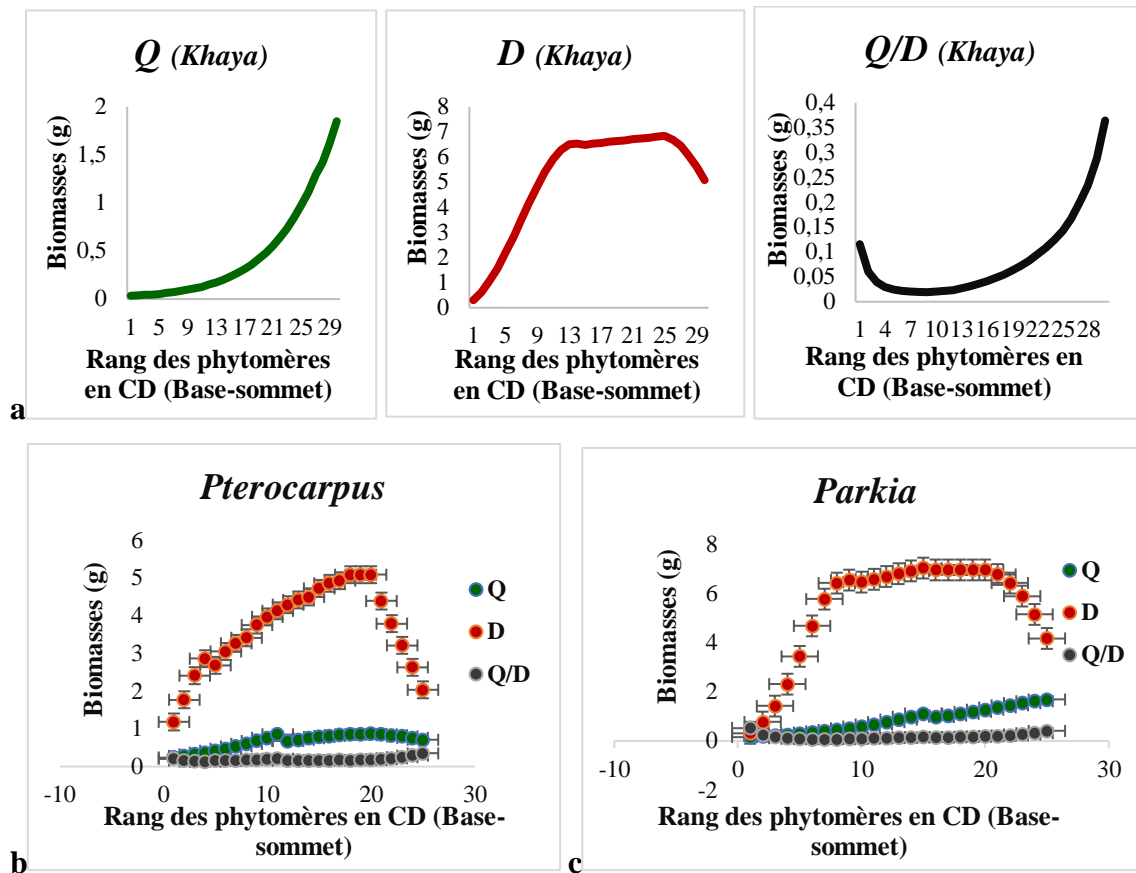


Figure 81: évolution de l'offre (Q), la demande (D) et du rapport d'offre-demande (Q/D) de biomasse le long des tiges de 6 mois selon le rang des phytomères

Chez *Khaya senegalensis* (a), *Pterocarpus erinaceus* (b) et *Parkia biglobosa* (c)

7.3.2.2.2. Simulation de l'architecture des espèces cibles à 6 mois

Les valeurs des paramètres de développement et de croissance trouvées par calibration sur les données permettent de simuler l'architecture des individus de 6 mois. La figure 82 montre la simulation de deux arbres à 6 mois ainsi que le profil des cernes et de la tige correspondant avec leurs anneaux respectifs à partir du logiciel Groups. A défaut de construction de feuilles bipennées chez l'espèce *Parkia biglobosa*, nous avons choisi les feuilles proposées par le modèle GreenLab (feuille simple) pour l'imagerie de synthèse chez cette espèce dans le présent document. Les premières feuilles meurt, disparaissent avec le temps, les feuilles vivantes augmentent en taille en fonction de leur rang.

Le profil de la tige montre que les parties dues à la moelle et à la croissance secondaire augmentent avec l'augmentation du diamètre de la tige (Figure 82a2, b2 et c2). Le profil avec

les anneaux montre que la moelle est épaisse (blanc) par rapport au bois (anneaux noir) qui n'a pas encore entamé sa constitution (Figure 82a, b et c).

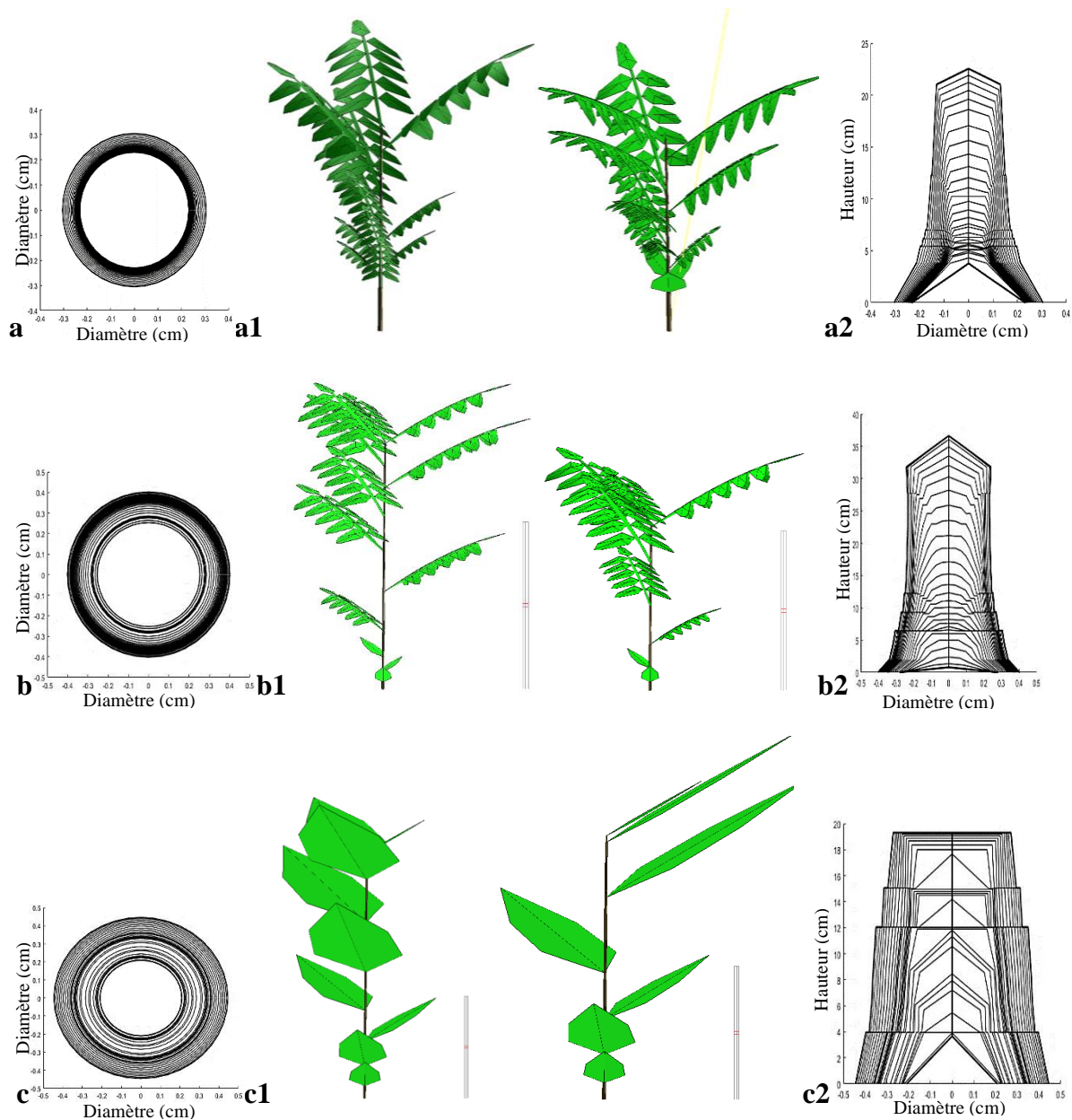


Figure 82 : simulation par le modèle GreenLab d'arbres âgés de 6 mois

Chez *Khaya senegalensis* (a, a1 et a2), *Pterocarpus erinaceus* (b, b1 et b2) et *Parkia biglobosa* (c, c1 et c2)

7.3.2.2.3. Croissance chez les arbres de 12 mois

A 12 mois, les unités de croissance sont identifiables le long de la tige (jusqu'à 6, 4 et 4 UCs respectivement chez *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* et *Parkia biglobosa*). La croissance des axes devient rythmique avec en moyenne 25, 20 et 15 phytomères par UC respectivement chez *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* et *Parkia biglobosa*. Le pas de temps de croissance s'exprime en macrocycles de développement (MCD) au lieu du

microcycle (CD) du fait du fonctionnement UC par UC. Chez *Khaya senegalensis*, le temps de fonctionnement des feuilles est de 6 MCD ($Ta = 150/25 \text{ CD} = 6 \text{ MCD}$). Au-delà de 6 UC à partir du sommet, les feuilles jaunissent. Le temps d'expansion est estimé à 6 MCD car le puits global de l'UC est supposé constant, c'est l'UC qui se détend en six macrocycles d'expansion TX ($TX = 150/25 \text{ CD} = 6 \text{ MCD}$) ; au-delà de 6 les feuilles arrêtent leur expansion. Chez *Pterocarpus erinaceus*, le temps de fonctionnement des feuilles est de 5 MCD ($Ta = 100/20 \text{ CD} = 5 \text{ MCD}$) ; au-delà de 5 UC à partir du sommet les feuilles jaunissent. Le temps d'expansion est estimé à 2 MCD car le puits global de l'UC est supposé constant, c'est l'UC qui se détend en deux macrocycles d'expansion TX ($TX = 40/20 \text{ CD} = 2 \text{ MCD}$), au-delà de 2 UCs les feuilles arrêtent leur expansion. Chez *Parkia biglobosa*, le temps de fonctionnement des feuilles est de 7 MCD ($Ta = 100/15 \text{ CD} = 6,66 \text{ MCD}$) ; au-delà de 7 UC à partir du sommet les feuilles jaunissent. Le temps d'expansion est estimé à 3 MCD, le puits global de l'UC est supposé constant, c'est l'UC qui se détend en trois macrocycles d'expansion TX ($TX = 40/15 \text{ CD} = 2,66 \text{ MCD}$), au-delà de 3 UCs les feuilles arrêtent leur expansion.

La surface de production Sp est également supposée très grande comme à 6 mois car les plants sont toujours en croissance libre. Ici les paramètres de l'activité du méristème permettent de calculer une collection de structures potentielles car une seule structure potentielle ne fonctionne pas avec des distributions binomiales négatives de phytomères par UC.

7.3.2.2.3.1. Expression des paramètres source-puits

A 12 mois, les plants ne ramifient toujours pas et sont décrit par un seul âge physiologique AP (tige) comme à 6 mois. Les 30 arbres sélectionnés par espèce ont les mêmes âges et présentent une distribution assez régulière du nombre d'entrenœuds assimilée à une binomiale négative ($N = -12$, $b = 0,56$ pour *Khaya senegalensis*, $N = -18$, $b = 0,69$ pour *Pterocarpus erinaceus* et $N = -13$, $b = 0,61$ pour *Parkia biglobosa*). Celle-ci combine le processus de *Bernoulli* avec l'arrêt de l'activité du méristème. Il faut donc calibrer les paramètres source-puits sur cette distribution. La croissance des tiges fonctionne d'UC à UC (rythmique). Les séries organiques composées des compartiments feuilles et entrenœuds représentent 12 données (6 par compartiment) ajustées par 3 paramètres chez *Khaya*, 8 données (4 par compartiment) ajustées par 3 paramètres chez *Pterocarpus* et également 8 données (4 par compartiment) ajustées par 2 paramètres chez *Parkia*. Il n'y a pas de paramètres de variation de puit des phytomères, car c'est l'UC qui se détend en six macrocycles d'expansion TX ($TX = 150/25 \text{ CD} = 6 \text{ MCD}$) chez *Khaya*, deux macrocycles d'expansion TX ($TX = 40/20 \text{ CD} = 2 \text{ MCD}$) chez *Pterocarpus* et trois macrocycles d'expansion TX ($TX = 40/15 \text{ CD} = 2,66 \text{ MCD}$)

chez *Parkia*. Le paramètre puits des organes n'est donc pas calculable et est constant. On lui donne la valeur trouvée à 6 mois. Il n'est pas possible de calculer Sp , qui est fixé arbitrairement à une grande valeur comme à 6 mois, à cause de la croissance libre.

La figure 83 montre les ajustements corrects des séries organiques par le modèle pour chaque espèce à 12 mois d'évolution. Les notations des titres, légendes et axes chez *Khaya senegalensis* (Figure 83a et a1) sont les mêmes chez *Pterocarpus erinaceus* (Figure 83b et b1) et *Parkia biglobosa* (Figure 83c et c1).

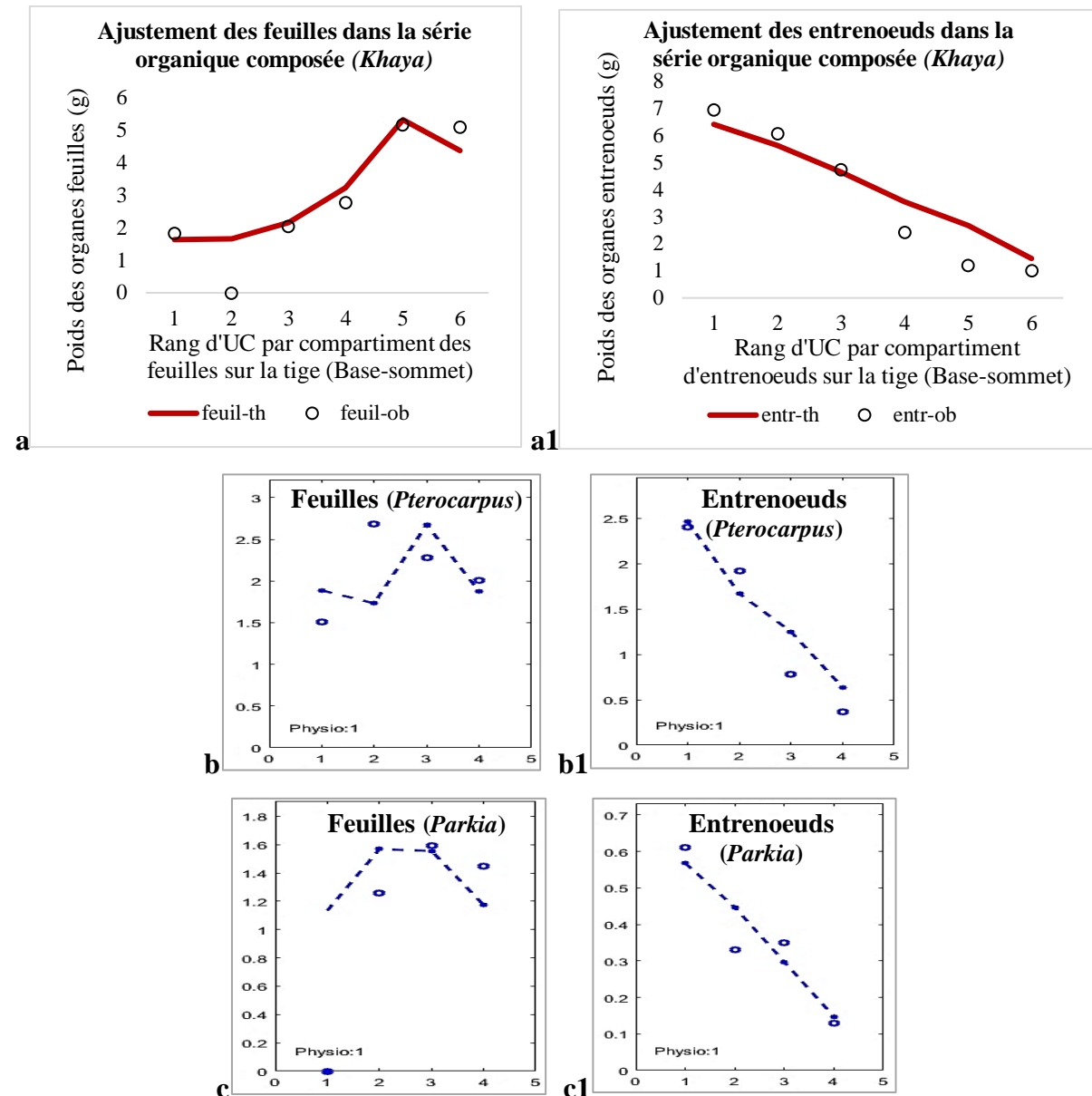


Figure 83: ajustement des séries organiques observées (cercle) et calculées (ligne) des organes feuilles et entrenœuds de la base au sommet des tiges âgés de 12 mois

Feuilles (a, b et c) et entrenœuds (a1, b1 et c1) chez *Khaya senegalensis* (a et a1), *Pterocarpus erinaceus* (b et b1) et *Parkia biglobosa* (c et c1)

Le Tableau 36 donne les différents paramètres cachés. Chez *Khaya senegalensis*, les échantillons ont eu une taille de 175 données avec 6 méta-cycles de développement ajustés par 3 paramètres cachés (r , Q_0 et Pc). Chez *Pterocarpus erinaceus*, les échantillons ont eu une taille de 100 données et 4 méta-cycles de développement ajustés par 3 paramètres cachés (r , Q_0 et Pc). Chez *Parkia biglobosa*, les échantillons ont eu une taille de 85 données avec 4 méta-cycles de développement ajustés par 2 paramètres cachés (r et Pc). Le coefficient de corrélation (R^2) entre les paramètres calculés (théoriques) et observés a été de 0,96 pour *Khaya senegalensis*, 0,95 pour *Pterocarpus erinaceus* et 0,9 pour *Parkia biglobosa*. Les paramètres sont cohérents avec les observations.

Tableau 36: paramètres source-puits chez les espèces cibles à 12 mois

Espèces	r	Sp	Q_0	Pc	α
<i>Khaya senegalensis</i>	44,21±8,67	100000	7,22±3,02	0,43±0,06	1
Cv -%	20	-	42	15	-
<i>Pterocarpus erinaceus</i>	14,56±3,61	100000	36,91±11,18	0,316±0,13	1
Cv -%	25	-	30	41	-
<i>Parkia biglobosa</i>	7,27±0,51	100000	-	0,24±0,09	1
Cv -%	7	-	-	38	-

r =résistance ou efficacité climatique ou de l'eau, SP =surface de production, Q_0 =biomasse initiale de la plante ou poids de la graine, Pc = puit des cernes.

La figure 84 montre l'évolution des rapports offre et demande selon le rang des UC à 12 mois. Chez *Khaya*, l'offre (Q) et le rapport offre-demande (Q/D) sont exponentiel et croissent de la base au sommet à cause l'activités photosynthétique des feuilles, alors que la demande (D) oscille du sommet à la base. Chez *Pterocarpus* et *Parkia*, l'offre (Q) croit et est exponentiel, ce qui montre que les feuilles grossissent progressivement de la base au sommet et ont une activité photosynthétique élevée. La grandeur de Sp ($Sp > 100000$) et la croissance libre sont validées.

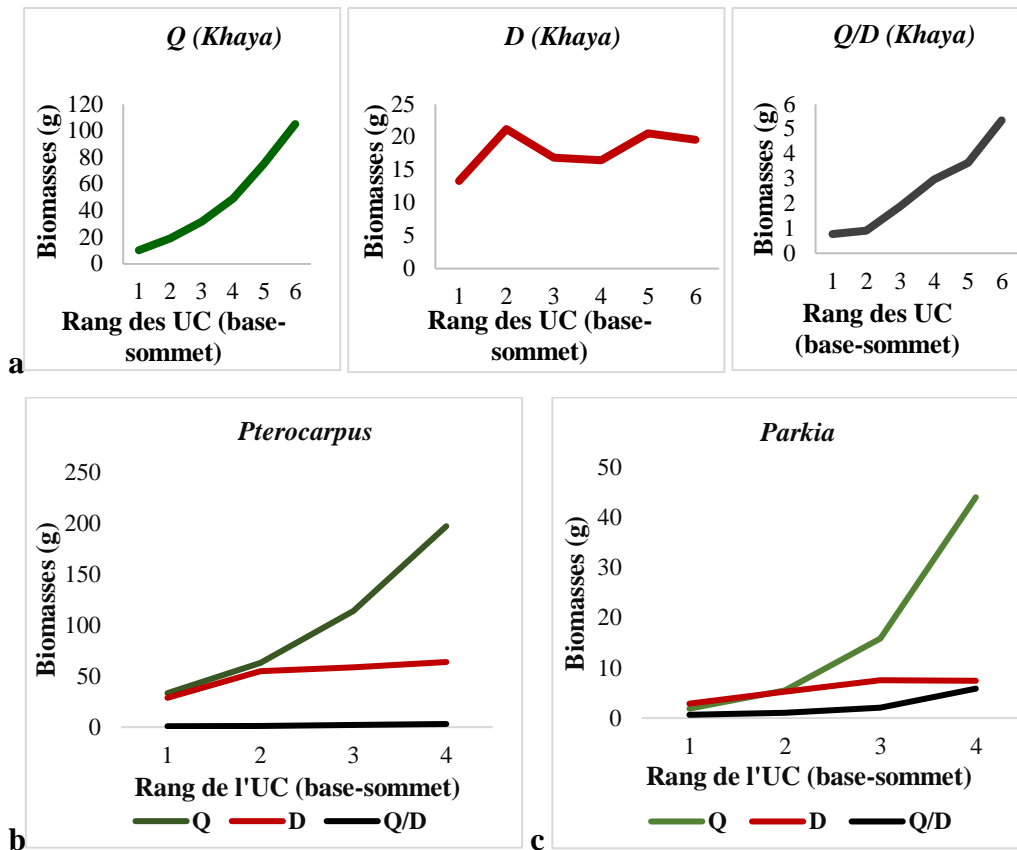


Figure 84 : évolution de l'offre (Q), la demande (D) et le rapport d'offre-demande (Q/D) le long des tiges de 12 mois selon le rang des unités de croissance

Chez *Khaya senegalensis* (a), *Pterocarpus erinaceus* (b) et *Parkia biglobosa* (c)

7.3.2.2.3.2. Simulation de l'architecture des espèces cibles à 12 mois

Les valeurs des paramètres de développement et de croissance trouvées par calibration sur les données permettent de simuler l'architecture des arbres à 12 mois. La figure 85 montre la simulation d'arbres à 12 mois, le profil des cernes de la tige avec les anneaux de croissance chez les espèces cibles avec le logiciel Gloups.

Le profil des cernes avec les anneaux montre le début de la constitution du bois (Figure 85a, b et c), les anneaux sont de plus en plus répartis (anneaux noirs) que la moelle (cercle blanc). Le profil des cernes de la tige (Figure 85a2, b2 et c2) montre la croissance rythmique et montre que la base de la tige est bien développée avec une grande quantité de bois que dans le sommet.

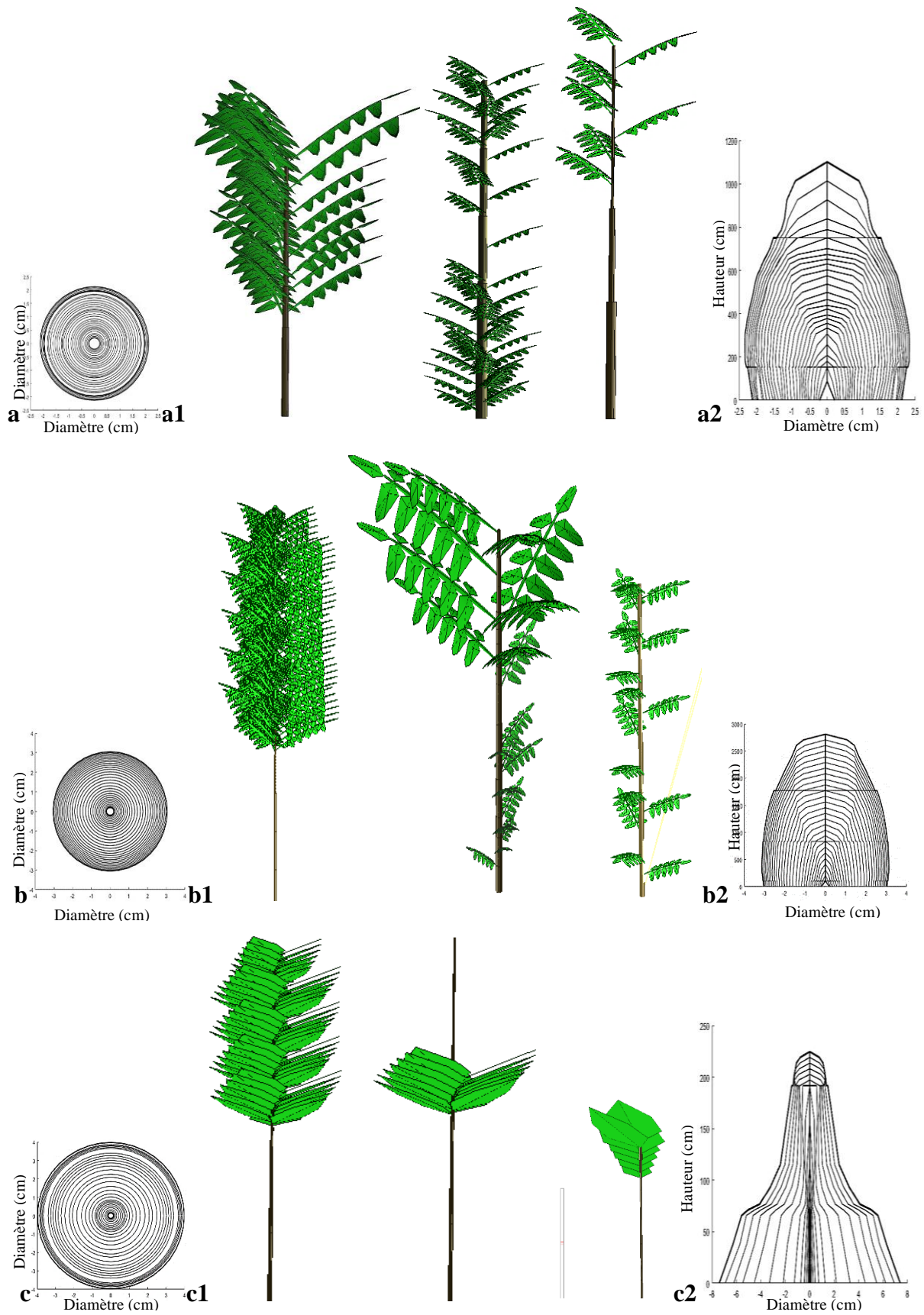


Figure 85 : simulation par le modèle GreenLab d'arbres de 12 mois

Chez *Khaya senegalensis* (a, a1 et a2), *Pterocarpus erinaceus* (b, b1 et b2) et *Parkia biglobosa* (c, c1 et c2)

7.3.2.2.4. Croissance chez les arbres de 2 ans

A cet âge les tiges ramifient. On a deux types d'axes : le tronc ayant jusqu'à 15 UC avec au plus 25 phytomères, 11 UC avec en moyenne 30 phytomères et 10 UC avec en moyenne 22 phytomères respectivement chez *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* et *Parkia biglobosa*. Les branches n'apparaissent qu'à partir de la 10^{ième}, 3^{ième} et 5^{ième} UC du tronc respectivement chez *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* et *Parkia biglobosa*. Elles ont donc un développement limité à 4, 7 et à 4 UC respectivement chez *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* et *Parkia biglobosa*. La croissance des axes reste rythmique comme à 1 an et le pas de temps de croissance s'exprime en macrocycles (MCD). Chez *Khaya senegalensis*, le temps de fonctionnement des feuilles reste 6 MCD ($Ta = 150/25$) comme à 12 mois. Au-delà de 6 UC à partir du sommet, les feuilles jaunissent. Comme chez les individus de 12 mois, les temps d'expansion sont identiques car il n'y a pas de variation de puits au niveau du méta-phytomère. L'UC se détend en six méta-cycles d'expansion TX ($TX = 150/25 = 6$ MCD) ; au-delà de 6 UC, les feuilles arrêtent leur expansion. Chez *Pterocarpus erinaceus*, le temps de fonctionnement des feuilles est de 4 MCD ($Ta = 120/30$ CD = 4 MCD), au-delà de 4 UC à partir du sommet, les feuilles jaunissent. Le temps d'expansion est estimé à 2 MCD ($TX = 60/30$ CD = 2 MCD) ; au-delà de 2 UC les feuilles arrêtent leur expansion. Chez *Parkia biglobosa*, le temps de fonctionnement des feuilles est de 4 MCD ($Ta = 80/20$ CD = 4 MCD), au-delà de 4 à partir du sommet, les feuilles jaunissent. Le temps d'expansion est estimé à 2 MCD ($TX = 40/20$ CD = 2 MCD) ; au-delà de 2 UC, les feuilles arrêtent leur expansion.

La surface de production Sp est également supposée très grande comme à 6 et 12 mois, car les plants sont toujours en croissance libre. Les distributions des phytomères par UC étant des binomiales négatives, les paramètres de l'activité du méristème nécessitent le calcul d'une collection de structures potentielles en lieu et place d'une seule structure potentielle comme à 12 mois.

7.3.2.2.4.1. Expression des paramètres source-puits cachés

Les 30 arbres sélectionnés par espèce ont le même âge et présentent une distribution assez régulière en nombre d'entrenœuds assimilé à une binomiale négative sur les tiges ($N = -12$, $b = 0,56$) et sur les branches ($N = -12$, $b = 0,66$) chez *Khaya senegalensis* ; sur les tiges ($N = -18$, $b = 0,69$) et sur les branches ($N = -18$, $b = 0,8$) chez *Pterocarpus erinaceus* ; sur les tiges ($N = -13$, $b = 0,61$) et sur les branches ($N = -13$, $b = 0,76$) chez *Parkia biglobosa*. Ces lois

binomiales négatives combinent le processus de *Bernoulli* avec l'arrêt de l'activité méristématique. Il faut donc calibrer les paramètres source-puits sur cette distribution.

Chez *Khaya senegalensis*, les séries organiques composées des compartiments feuilles et entrenœuds représentent 24 données pour les tiges (15 pour les entrenœuds et 9 pour les feuilles) et 8 données pour les branches (4 pour les entrenœuds et 4 pour les feuilles) ajustées par 9 paramètres.

Chez *Pterocarpus erinaceus*, les séries organiques composées des compartiments feuilles et entrenœuds représentent 22 données pour les tiges (11 pour les entrenœuds et 11 pour les feuilles) et 8 données pour les branches (5 pour les entrenœuds et 3 pour les feuilles) ajustées par 6 paramètres.

Chez *Parkia biglobosa*, les séries organiques composées des compartiments feuilles et entrenœuds représentent 18 données pour les tiges (10 pour les entrenœuds et 8 pour les feuilles) et 7 données pour les branches (4 pour les entrenœuds et 3 pour les feuilles) ajustées par 3 paramètres.

A l'âge de 24 mois également, il n'y a pas de paramètres de variation de puits des phytomères, c'est l'UC qui se détend en Macrocycles d'expansion. Le paramètre de la variation du puits des organes n'est donc pas calculable et est constant. On lui donne les valeurs trouvées de 6 et 12 mois. Il n'est pas possible de calculer Sp , qui est fixé arbitrairement à une grande valeur comme les cas précédents, à cause de la croissance libre.

7.3.2.2.4.1.1. Expression de l'application et de l'insuffisance de la loi de Pressler : l'exemple de *Khaya senegalensis*

La figure 86 montre que la loi de *Pressler* ne s'applique pas. La distribution de *Pressler* répartit d'une façon uniforme les éléments de cernes le long de la tige. Elle ne prend pas en compte ici une accumulation évidente de biomasse dans le bas de la tige. Il y a donc probablement une dilatation de l'élément de cerne lorsqu'on progresse vers la base de l'arbre. La figure 86 corrige cet défaut avec un bon ajustement chez *Khaya senegalensis*.

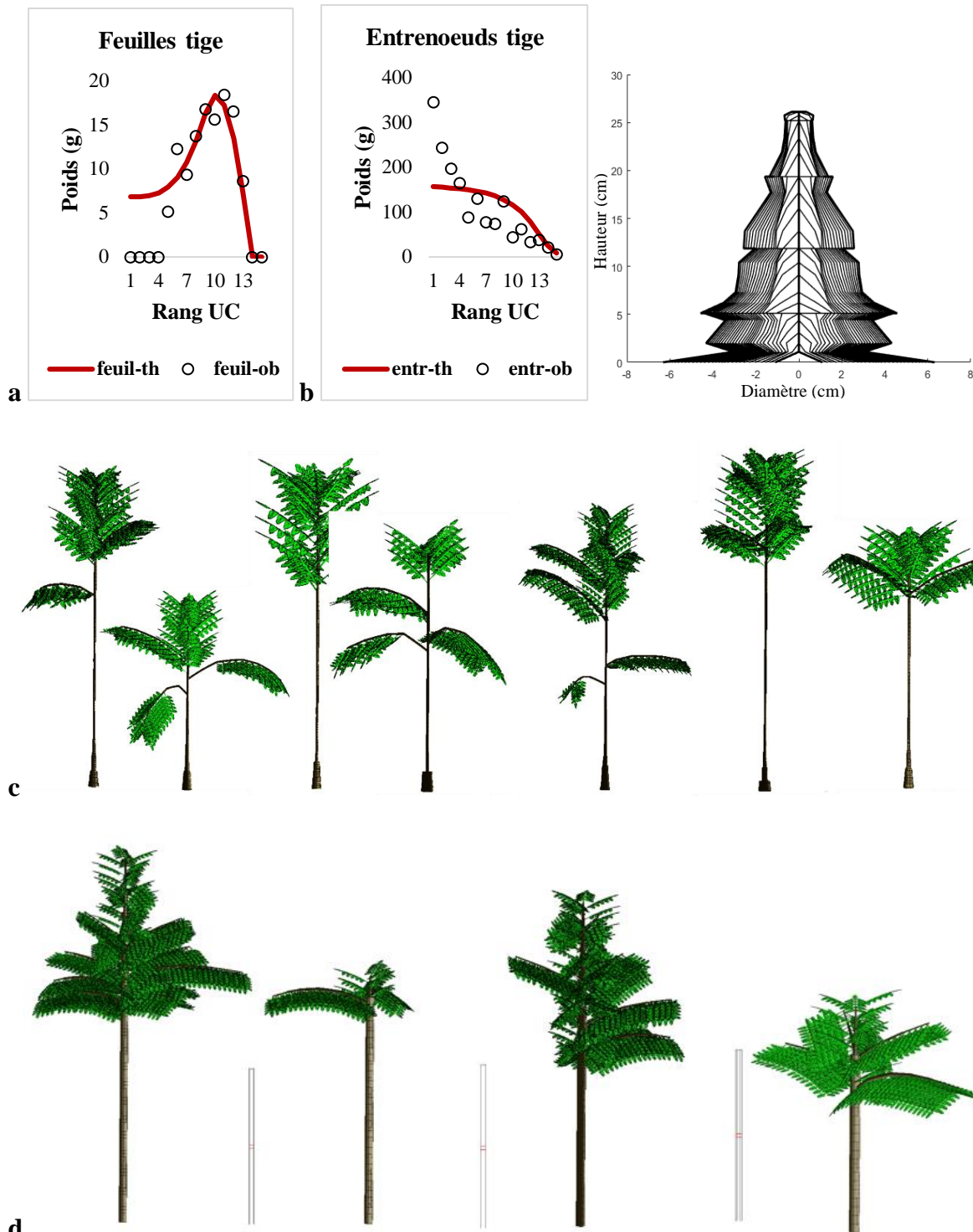


Figure 86 : ajustements des séries organiques et simulation d'architecture avec erreur et correction dans la loi de *Pressler*

a : Ajustement correct des feuilles, **b** : ajustement non correct des entrenœuds des tiges avec la non application de la loi de *Pressler*, **c** : simulation de sept arbres à *Khaya senegalensis* âgés de 2 ans illustrant la non application de la loi de *Pressler* ($\lambda < 1$), la base de la tige a une dilatation plus grande que celle prévue par la loi de *Pressler*, **d** : simulation de quatre arbres de *Khaya senegalensis* âgés de 4 ans prenant en compte la loi de *Pressler* ($\lambda = 1$), l'élément de cerne (assimila) est diffusé et réparti de façon uniforme le long de la tige (*Pressler*)

Le Tableau 37 donne les différents paramètres cachés de l'accumulation évidente de biomasse lorsqu'on progresse vers la base de l'arbre. L'échantillon à une taille de 400 organes (cycles) avec 15 méta-cycles de développement ajusté par 4 paramètres cachés (r , Q_0 , Pc et Pil). Le coefficient de corrélation entre les paramètres calculés (théoriques) et observés est $R^2 = 0,98$. La biomasse totale produite (TQ) est de 11061,2g ; la biomasse fabriquée au dernier cycle ($Q(T)$) est de 1838,36g ; la demande au dernier cycle ($D(T)$) est 399,22 et la demande des cernes au dernier cycle ($Dc(T)$) est de 308,12.

Tableau 37 : paramètres source-puits de l'erreur de la loi de *Pressler* chez *Khaya senegalensis* à 24 mois

Ages	r	Q_0	Pc	\mathcal{L}	Pil
Erreur	31,82±2,74	96,67±31,08	1,92±0,21	1	0,15±0,17
Pressler Cv	9	32	11	-	112
24 mois -%					

r =résistance ou efficacité climatique ou de l'eau, SP =surface de production, Q_0 =biomasse initiale de la plante ou poids de la graine, Pc = puit des cernes, Pil = puit des entrenœuds.

La figure 87 montre différentes modes de simulations de structures (List, Phyto_Facto et Pressler), avec l'effet des paramètres source-puits, puis le multi-ajustement à 12 et 24 mois par correction et combinaison du mode Phyto_Facto et Pressler chez *Khaya senegalensis*. La correspondance avec la loi de *Pressler* (ligne en pointillés) montre clairement son inadéquation à la prise en compte de l'évolution des diamètres des axes et l'efficacité de la correction. La qualité de l'ajustement multi-échelle à 12 et 24 mois est présenté par la figure 87b.

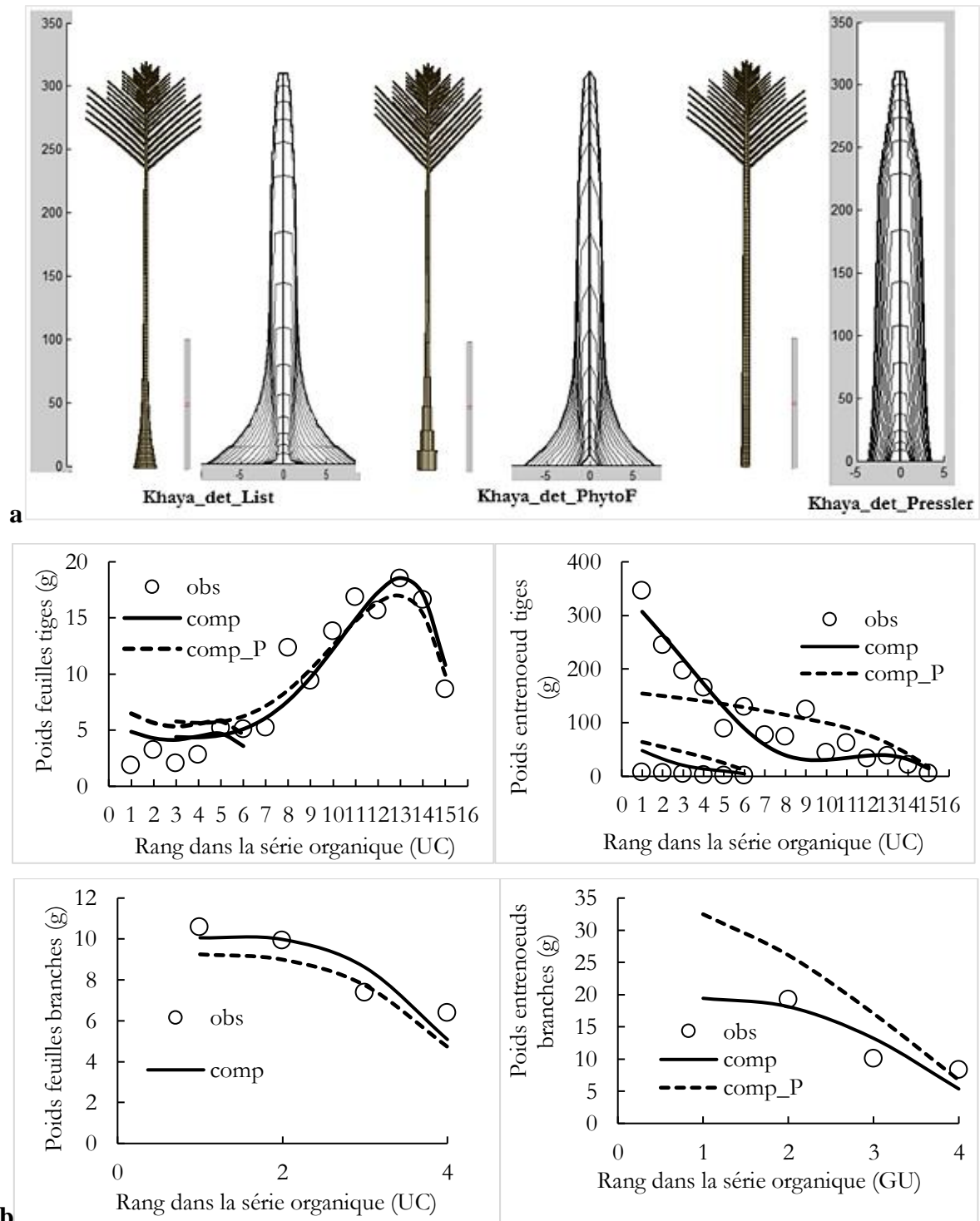


Figure 87 : différents modes de simulation et multi-ajustements avec la loi de *Pressler*

a : effet des paramètres source-puits sur la structure de l'arbre selon le mode de simulation, **b** : multi-ajustement des individus de 12 et 24 mois par combinaison de différents modes de simulations et la correction de la loi de *Pressler*

7.3.2.2.4.1.2. Correction de la loi de Pressler : l'exemple de *Khaya senegalensis*

La section de l'élément de cerne le long des axes est constante dans la loi de *Pressler*. Dans le cas présent, pour une même quantité de biomasse allouée à l'élément de cerne sur une UC, il faut la faire varier de haut en bas d'une façon optimale pour ajuster au mieux le diamètre du tronc. Mais la longueur du tronc évolue. La loi de la section de l'élément de cerne doit évoluer également. On pose que cette loi se dilate en gardant constant les paramètres puits des entrenoeuds.

Le puits de l'élément de cerne est donc calculé pour tous les âges i et toutes les position x sur le tronc. La force de puit croît jusqu'à un maximum de 1, de la base au sommet de la tige chez les trois espèces cibles. La figure 88 présente l'exemple chez *Khaya senegalensis*. Chez cette dernière, cette force de puit croît jusqu'à 1, de l'UC1 (base de la tige) jusqu'à l'UC15 (sommet de la tige). Le forme du puit des cernes (P_c) est asymétrique avec une loi bêta de paramètre $a=2$ et $b=1$ (Figure 88). P_c (Puit des cernes) et B_c (Expansion des cernes) sont calculés par la méthode des moindres carrés en même temps que les autres paramètres cachés.

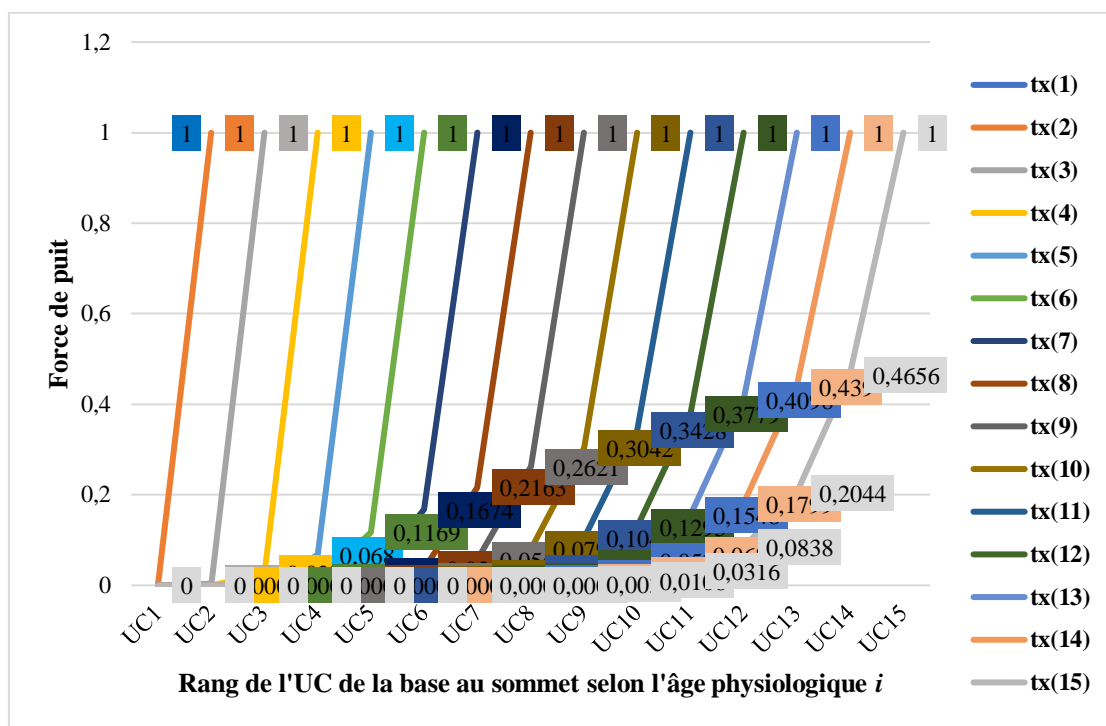


Figure 88 : image relative à l'évolution de la loi de la section de l'élément de cerne en fonction de l'âge physiologique le long du tronc chez *Khaya senegalensis*

La variation du puit de l'élément de cerne le long du tronc se définit par $txc(i)$ le nombre d'UC du tronc à l'âge i . Le puits du cerne situé à x UC du sommet s'écrit $Pxc(i) = Pc * Bc * (txc(i))^{(i-x+1)}$ (34). Pc est la force de puits de l'élément de cerne, et Bc un coefficient de dilataion. La variation du puits $Pxc(i,x)$ en fonction de la position x (UC) sur la tige à l'âge i s'écrit : $tx(i)=i$; $Pxc(i,x) = Pc * ((x-0.5)/tx(i))^{(Bc - 1)}$ (35).

La figure 89 montre les ajustements des séries organiques à 2 ans par le modèle GreenLab chez les trois espèces cibles. Les notations des titres, légendes et axes de figure chez *Khaya senegalensis* (Figure 89a, a1, a2 et a3) sont les mêmes chez *Pterocarpus erinaceus* (Figure 89b, b1, b2 et b3) et *Parkia biglobosa* (Figure 89c, c1, c2 et c3).

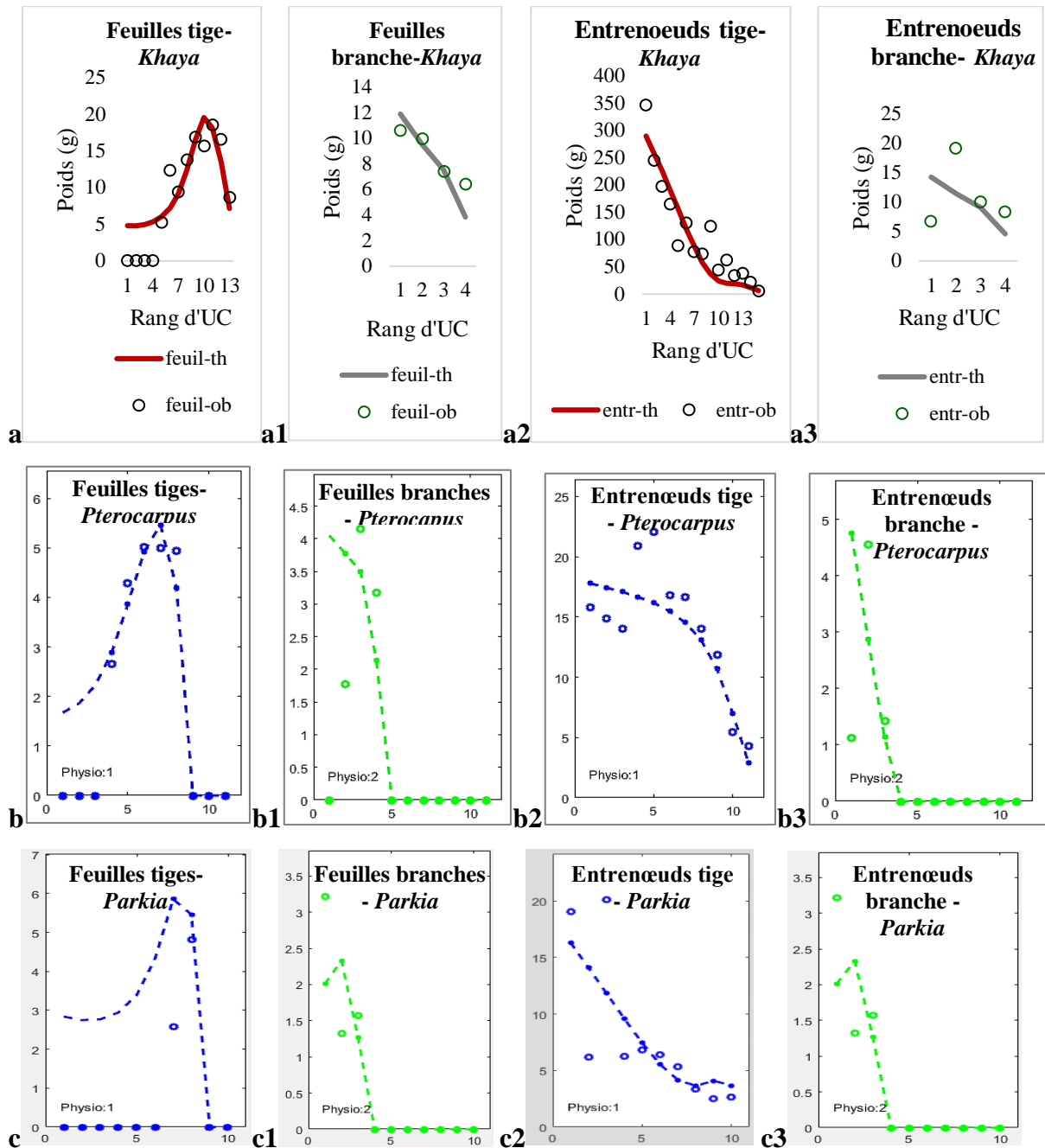


Figure 89 : ajustement des séries organiques observées (cercle) et calculées (ligne) des organes des axes de plants de 2 ans

Feuilles des tiges (a, b et c) et des branches (a1, b1 et b1), entrenœuds des tiges (a2, b2 et c2) et des branches (a3, b3 et c3), chez *Khaya senegalensis* (a, a1, a2 et a3), *Pterocarpus erinaceus* (b, b1, b2 et b3) et *Parkia biglobosa* (c, c1, c2 et c3) à 24 mois

Chez *Khaya senegalensis*, l'échantillon a une taille de 400 organes avec 15 méta-cycles de développement à ajusté par 9 paramètres cachés. Le coefficient de corrélation (R^2) entre les paramètres calculés (théoriques) et observés est de 0,98. La biomasse totale produite (TQ) est de 6470,97g ; la biomasse fabriquée au dernier cycle ($Q(T)$) est de 1125,67g ; la demande au dernier cycle ($D(T)$) est 261,61 et la demande des cernes au dernier cycle ($Dc(T)$) est de 96,67.

Chez *Pterocarpus erinaceus*, l'échantillon a une taille de 360 organes avec 11 méta-cycles de développement ajusté par 7 paramètres cachés. Le coefficient de corrélation (R^2) entre les paramètres calculés (théoriques) et observés est de 0,97. La biomasse totale produite (TQ) est de 691,24g ; la biomasse fabriquée au dernier cycle ($Q(T)$) est de 109,44g ; la demande au dernier cycle ($D(T)$) est 22,48 et la demande des cernes au dernier cycle ($Dc(T)$) est de 12,52.

Chez *Parkia biglobosa*, l'échantillon a une taille de 220 organes avec 10 méta-cycles de développement ajusté par 6 paramètres cachés. Le coefficient de corrélation (R^2) entre les paramètres calculés (théoriques) et observés est de 0,86. La biomasse totale produite (TQ) est de 141,84g ; la biomasse fabriquée au dernier cycle ($Q(T)$) est de 26,56g ; la demande au dernier cycle ($D(T)$) est 6,78 et la demande des cernes au dernier cycle ($Dc(T)$) est de 1,6.

Toutes les données sont cohérentes avec les observations. Le Tableau 38 donne les différents paramètres sources puits cachés calculés par le modèle chez les trois espèces cibles. La résistance des feuilles à la transpiration (r) a été de 32,2, de 55,76 et de 86,64 respectivement chez *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* et *Parkia biglobosa*. La biomasse des premières UCs ($Q0$) a été de 71,3, de 40,25 et de 7,37 respectivement chez *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* et *Parkia biglobosa*. Le puit des cernes (Pc) a été de 1,1, de 0,65 et de 0,26 respectivement chez *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* et *Parkia biglobosa*. Le puit d'entre-noeud des tiges a été de 1,9, de 1,07 et de 0,36 respectivement chez *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* et *Parkia biglobosa*. Le puit d'entre-noeud des tiges a été de 0,9, de 0,22 et de 0,16 respectivement chez *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* et *Parkia biglobosa*.

Tableau 38 : paramètres source-puits des individus de 24 mois chez les espèces cibles

Espèces	<i>r</i>	<i>Sp</i>	<i>Q₀</i>	<i>Bb1</i>	<i>Bi1</i>	<i>Pc</i>	<i>Pb2</i>	<i>Bc1</i>	<i>κ</i>	<i>Pi1</i>	<i>Pi2</i>
<i>Khaya senegalensis</i>	32,2± 5,3	1000 00	71,3± 25,4	1,3±0 ,2	2±0,5	1,1± 0,3	0,5±0	13,8 ±7,6	1	1,9± 1	0,9±0, 2
<i>Cv</i> -%	17	-	36	17	24	25	8	55	-	52	20
<i>Pterocarpus erinaceus</i>	55,76± 11,16	100 000	40,25± 18,67	2,28±1, 32	-	0,65±0, 35	0,56± 0,12	-	1	1,07±0, 85	0,22± 0,23
<i>Cv</i> -%	20	-	46	58	-	53	21	-	-	79	104
<i>Parkia biglobosa</i>	86,64± 10,76	100 000	7,37±1 1,92	-	-	0,26±0, 13	-	10,46 ±8,77	1	0,36±0, 48	0,16± 0,2
<i>Cv</i> -%	13	-	162	-	-	49	-	180	-	136	121

r=résistance ou efficacité climatique ou de l'eau, *SP*=surface de production, *Q₀*=biomasse initiale de la plante ou poids de la graine, *Bc1*=lois bêta de la variation de l'expansion des cernes, *Bb1*= loi bêta d'expansion des feuilles, *Bi1*=lois bêta d'expansion des entrenœuds, *Pc*= puit des cernes, *Pb*=puit des feuilles, *Pi1*= puit des entrenœuds, *I*=tiges, *2*=branches

La figure 90 montre l'évolution des rapports offre et demande selon le rang des UCs à 24 mois. Chez *Khaya senegalensis* et *Pterocarpus erinaceus*, l'offre (*Q*) et la demande (*D*) croissent tout au long de l'axe à cause de la fabrication des organe et l'expansion des feuilles du sommet de la tige. Chez *Parkia biglobosa*, la croissance de l'offre (*Q*) tout au long de l'axe montre que les plants sont en croissance libre et que les organes sont de plus en plus gros de la base vers le sommet des tiges.

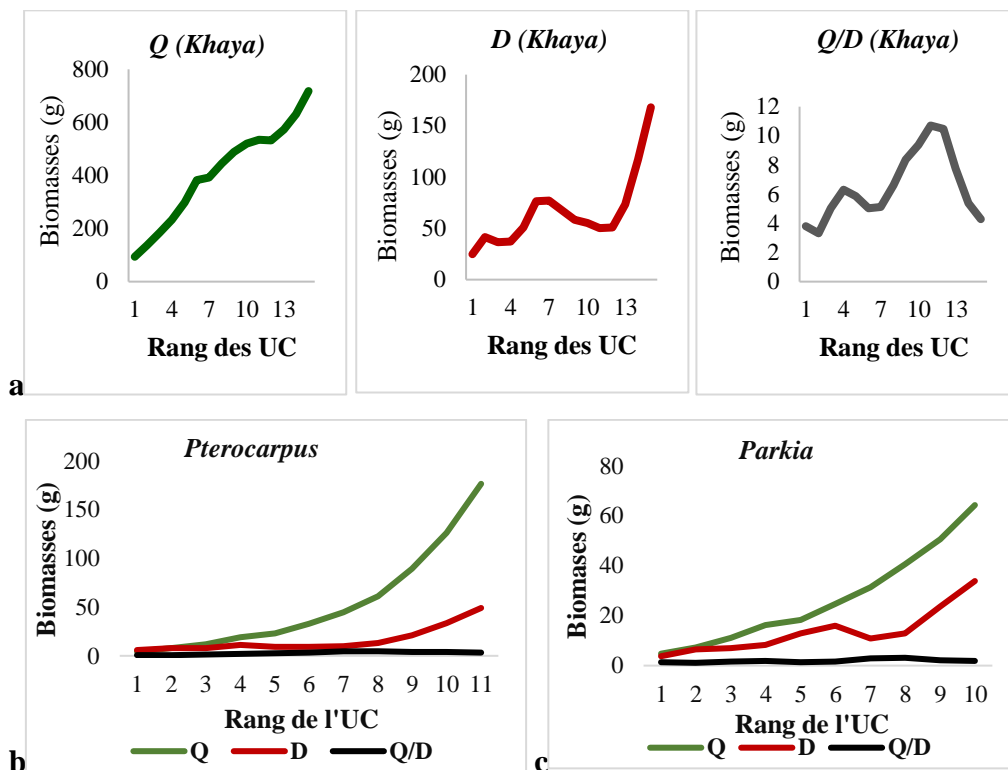


Figure 90 : évolution de l'offre (*Q*), la demande (*D*) et du rapport d'offre-demande (*Q/D*) le long des tiges de 2 ans selon le rang des UC

Chez *Khaya senegalensis* (a), *Pterocarpus erinaceus* (b) et *Parkia biglobosa* (c)

7.3.2.2.5. Multi-ajustements des paramètres source et puit des séries organiques de 12 et 24 mois chez les espèces cibles

Ici, en plus du dernier stade de 24 mois de mesures, on dispose d'un stade intermédiaire de 12 mois. Seul ces deux stades ont des UC. Chaque stade est le résultat de récolte effectuée sur 30 arbres par espèce. Les données sont ajustables simultanément dans les séries organiques composées. Les valeurs des paramètres sont des constantes qui contrôlent bien les ajustements des séries organiques pendant la croissance.

La figure 91 montre que les séries organiques des deux stades sont correctement ajustées par le modèle GreenLab chez *Khaya senegalensis* (Figure 91a et a1), *Pterocarpus erinaceus* (Figure 91b et b1) et *Parkia biglobosa* (Figure 91c et c1). Les notations des titres, légendes et axes des figures relatives à *Khaya senegalensis* (Figure 91a et a1) sont les mêmes que les figures de *Pterocarpus erinaceus* (Figure 91b et b1) et *Parkia biglobosa* (Figure 91c et c1).

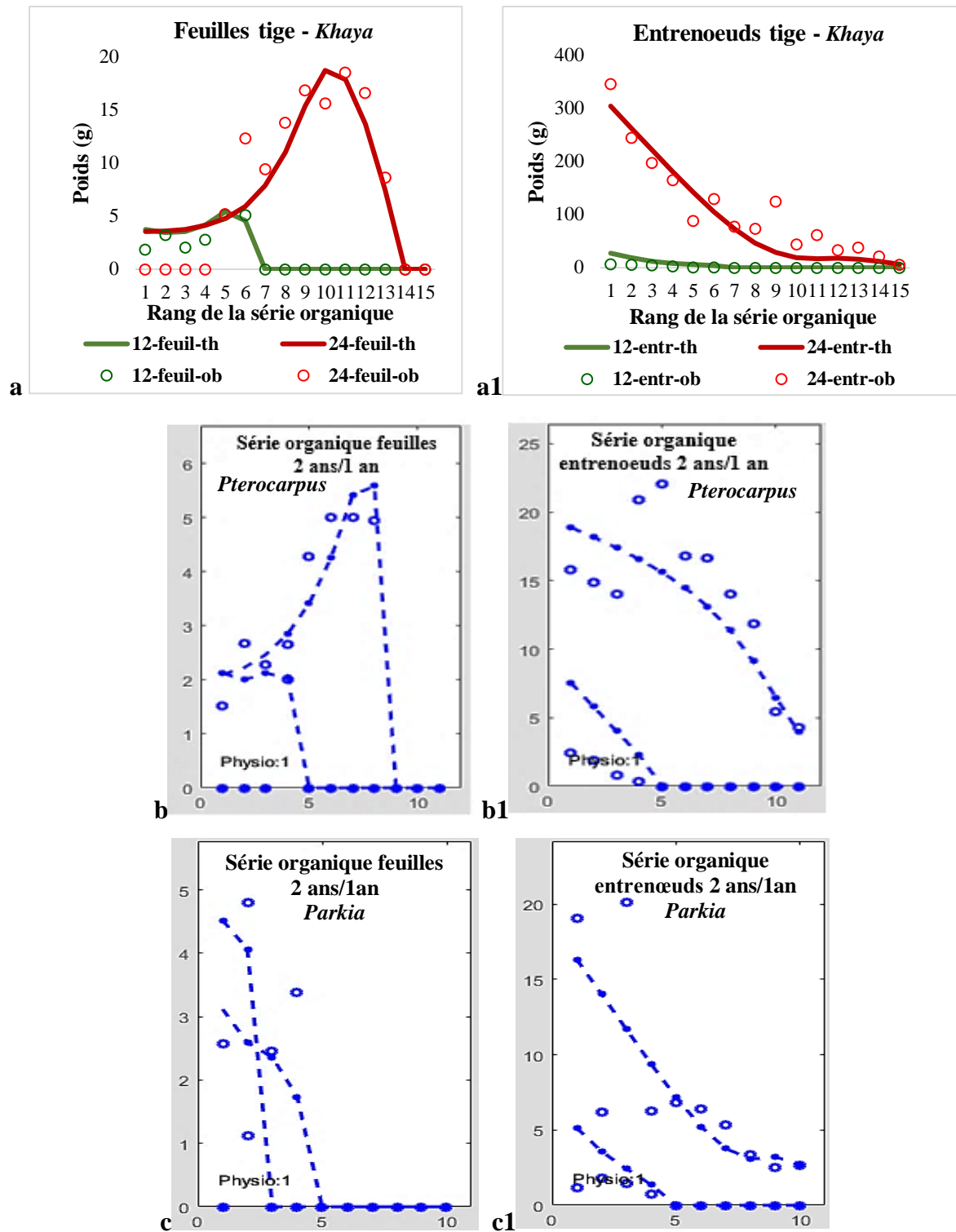


Figure 91 : ajustement multi-stades des séries organiques observées (o) et calculées (courbes) des organes des tiges de 12 et 24 mois

Feuilles (a, b et c) et entrenœuds (a1, b1 et c1) chez *Khaya senegalensis* (a et a1), *Pterocarpus erinaceus* (b et b1) et *Parkia biglobosa* (c et c1)

Chez *Khaya senegalensis*, l'échantillon du multi-ajustement a une taille de 575 données avec 15 méta-cycles de développement ajusté par 9 paramètres cachés (Tableau 39). Le coefficient de corrélation (R^2) entre les paramètres calculés (théoriques) et observés est de 0,99. La biomasse totale produite (TQ) est de 8015,41g ; la biomasse fabriquée au dernier cycle ($Q(T)$) est de 1371,49g ; la demande au dernier cycle ($D(T)$) est 155,33 ; la demande des cernes au dernier cycle ($Dc(T)$) est de 73,66 ; la demande des cernes au dernier cycle du tronc ($Dc1(T)$) est de 736,24 et la demande des cernes au dernier cycle des branches ($Dc2(T)$) est de 745,97.

Chez *Pterocarpus erinaceus*, l'échantillon du multi-ajustement a une taille de 460 données avec 11 méta-cycles de développement ajusté par 7 paramètres cachés (Tableau 39). Le coefficient de corrélation (R^2) entre les paramètres calculés (théoriques) et observés est de 0,93. La biomasse totale produite (TQ) est de 662,45g ; la biomasse fabriquée au dernier cycle ($Q(T)$) est de 104,15g ; la biomasse des cernes au dernier cycle ($Qc(T)$) est de 73,27 ; la demande au dernier cycle ($D(T)$) est 20,89 ; la demande des cernes au dernier cycle ($Dc(T)$) est de 14,61 ; la demande des cernes au dernier cycle du tronc ($Dc1(T)$) est de 283,34 et la demande des cernes au dernier cycle des branches ($Dc2(T)$) est de 742,96.

Chez *Parkia biglobosa*, l'échantillon du multi-ajustement a une taille de 305 données avec 10 méta-cycles de développement ajusté par 7 paramètres cachés (Tableau 39). Le coefficient de corrélation (R^2) entre les paramètres calculés (théoriques) et observés est de 0,97. La biomasse totale produite (TQ) est de 621,49g ; la biomasse fabriquée au dernier cycle ($Q(T)$) est de 141,7g ; la biomasse des cernes au dernier cycle ($Qc(T)$) est de 59,87 ; la demande au dernier cycle ($D(T)$) est 40,11 ; la demande des cernes au dernier cycle ($Dc(T)$) est de 24,06 ; la demande des cernes au dernier cycle du tronc ($Dc1(T)$) est de 166,33 et la demande des cernes au dernier cycle des branches ($Dc2(T)$) est de 517,24.

Toutes les données sont cohérentes avec les observations. Le Tableau 39 donne les différents paramètres du fonctionnement de la plante calculés par le modèle chez les trois espèces cibles.

Tableau 39 : paramètres source-puits du multi-ajustement des stades 12 et 24 mois chez les espèces cibles

Espèces	<i>r</i>	<i>Q</i> ₀	<i>Bb1</i>	<i>Bi1</i>	<i>Pc</i>	<i>Pb2</i>	<i>Bc1</i>	<i>Pi1</i>	<i>Pi2</i>
<i>Khaya</i>	28,96±	74,54±	1,24±	1,99±	1,23±0,	0,6±0,05	17,25±	2,17±0,	0,95±0,1
<i>senegalensis</i>	4,12	24,58	0,2	0,45	27		10,1	92	8
<i>Cv</i> -%	14	33	16	23	22	8	55	42	19
<i>Pterocarpus</i>	52,52±8	24,1±9,	2,33±	-	0,97±0,3	0,56±0,	-	0,16±0,	0,11±0,2
<i>erinaceus</i>	,11	45	1,01		8	11		01	5
<i>Cv</i> -%	15	39	43	-	39	20	-	498	2460
<i>Parkia</i>	83,24±1	7,87±0,	-	-	0,44±0,2	-	11,82±	0,71±0,	0,36±0,3
<i>biglobosa</i>	1,06	986			5		5,18	53	1
<i>Cv</i> -%	11	162	-	-	49	-	203	107	1381

Cv-%= Coefficient de variation en pourcentage, *r*=résistance ou efficacité climatique ou de l'eau, *SP*=surface de production, *Q*₀=biomasse initiale de la plante ou poids de la graine, *Bc1*=lois bêta de la variation de l'expansion des cernes, *Bb1*= loi bêta d'expansion des feuilles, *Bi1*=lois bêta d'expansion des entrenœuds, *Pc*= puit des cernes, *Pb*=puit des feuilles, *Pi1*= puit des entrenœuds, *I*=tiges, *2*=branches.

7.3.2.2.5.1. Simulation de l'architecture des espèces à 24 mois

Les valeurs des paramètres de développement et de croissance obtenues par calibration sur les données permettent de simuler l'architecture des espèces à 24 mois. La figure 92 montre la simulation d'arbres à 24 mois ainsi que le profil des anneaux de croissance chez les espèces cibles. Le profil des cernes montre que la densité du bois est bien constituée par rapport à la moelle (Figure 92a, b et c).

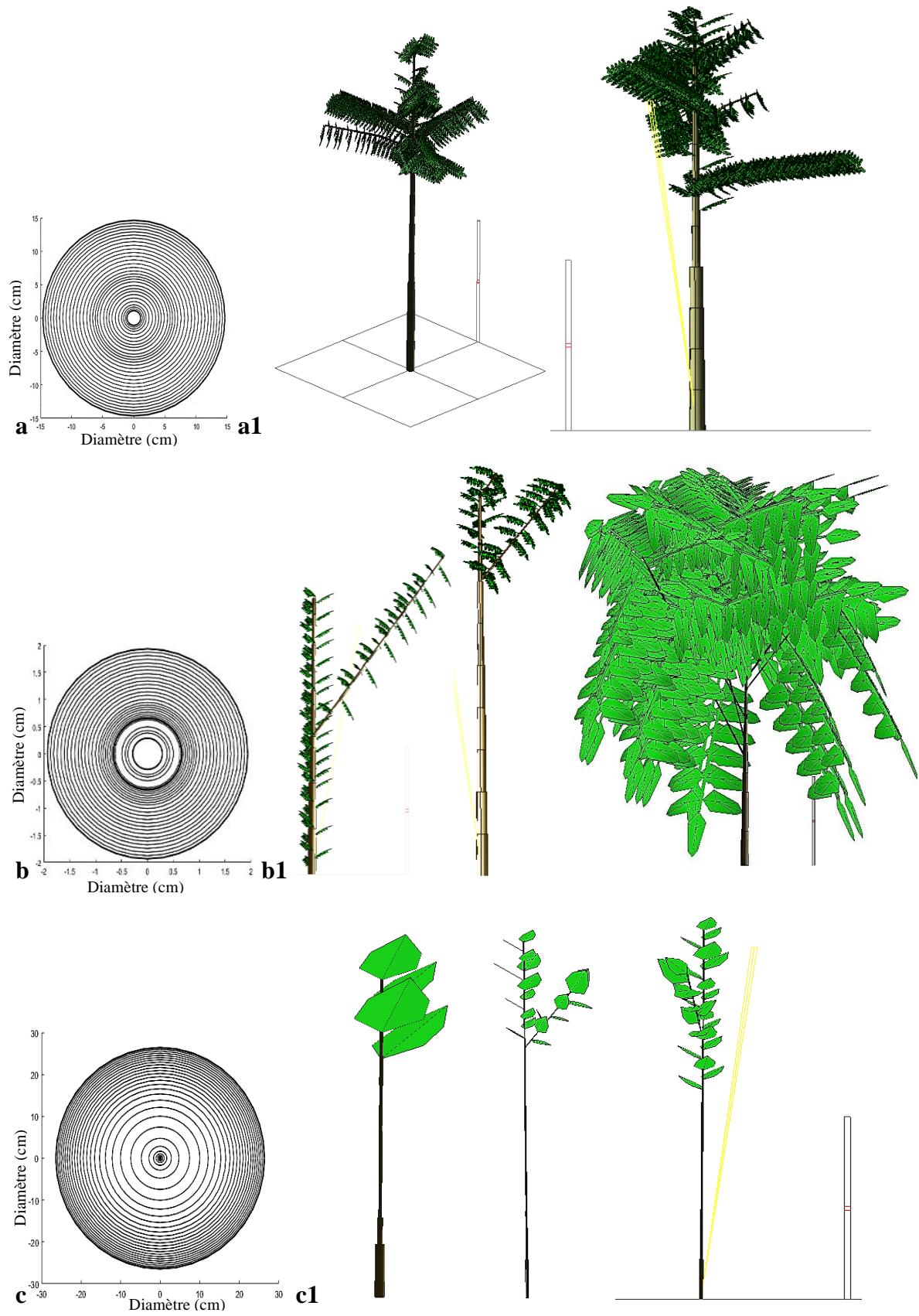


Figure 92 : simulation par le modèle GreenLab d'arbres de 2 ans

Chez *Khaya senegalensis* (a et a1), *Pterocarpus erinaceus* (b et b1) et *Parkia biglobosa* (c et c1)

Chapitre 8 : Discussion

8.1. Germination et croissance des jeunes plants chez les espèces cibles

Cette section traite la germination et la vigueur des jeunes plants des espèces cibles dans deux environnements. Il ressort de cette étude que les trois espèces ont un bon potentiel de régénération. Ce potentiel est influencé par la taille des graines et l'environnement maternel. Ainsi, chez l'espèce *Khaya senegalensis*, les grosses graines ont une bonne germination et produisent des jeunes plants vigoureux quel que soit l'environnement. Il en est de même chez l'espèce *Pterocarpus erinaceus*. Cependant, chez l'espèce *Parkia biglobosa*, ce sont les graines de petite taille et celles de taille moyenne qui ont un bon potentiel de germination. Toutefois, les semis issus des grosses graines ont été plus vigoureux. Les résultats ont montré que la germination des graines était assez rapide chez les espèces cibles. En définitive, les grosses graines pourraient être fournies aux agriculteurs pour aider les programmes d'agroforesterie et de reboisement en Côte d'Ivoire.

8.1.1. Germination chez les espèces cibles

Ces espèces ont montré une courte durée de germination, généralement en moins de 20 jours. De plus, l'étalement de la germination n'était pas assez grand, moins de 60 jours. Cela montre une bonne aptitude à la régénération sexuelle pour ces espèces, en cas de propagation et de dissémination naturelle. En effet, l'état de régénération et propagation naturelle de ces espèces est encore méconnu en Côte d'Ivoire. L'étude de la germination de ces espèces est un premier pas vers leur conservation et leur domestication, du moment où, elle ouvre des pistes et des perspectives de recherche pour leur gestion durable. La capacité germinative appréciable constatée chez ces espèces montre également que la perte de diversité et la menace d'extinction qui pèsent sur leur peuplement peuvent être endiguées, avec une volonté d'aménagement par des programmes de replantation artificielle. Nos résultats sont similaires à ceux trouvés chez *Terminalia superba*, *Mansonia altissima* et *Pterygota macrocarpa* (Akaffou *et al.*, 2019). En revanche, pour d'autres espèces d'arbres comme *Sideroxylon contrerasii* et *Elaeocarpus prunifolius*, la germination a été plus longue, puisque 434 jours et 146 jours ont été nécessaires pour atteindre la germination maximale ou moyenne (Toledo-Aceves, 2017 ; Iralu & Upadhaya, 2018).

Par ailleurs, les paramètres de germination utilisés et la dynamique de germination des graines ont été significativement influencés par la taille des graines et le site expérimental. Pour

Khaya senegalensis et *Pterocarpus erinaceus*, les graines de grande et moyenne taille ont montré une germination rapide et ont vite atteint le maximum de germination, contrairement aux petites graines. Les grosses et moyennes graines ont également donné les plus grands taux de germination à cause de la quantité de réserve d'amidon contenue dans cette catégorie de taille de graine. En effet, les grosses graines ont une grande réserve d'amidon qui leur permet d'exprimer un bon potentiel germinatif. Cette grande réserve leur permet d'avoir des réactions biochimiques plus fluides, d'être tolérantes à d'éventuelles inhibitions dû à l'environnement maternel. Cette réserve leur permet d'être dans un état indépendant sur un temps plus long par rapport aux petites graines. Chez ces deux espèces, les grosses graines sont donc les meilleurs candidats pouvant être vulgarisées et/ou commercialisable au près des producteurs particuliers ou des structures en charge de la gestion forestière pour optimiser leur culture. Nos résultats sont cohérents avec ceux de Burslem & Miller (2001), puis de Deb & Sundriyal (2017), qui ont rapporté une germination meilleure et rapide des grosses graines respectivement chez trois et quatre espèces d'arbres tropicaux. Un tel résultat a également été trouvé chez *Pinus thunbergii* (Mao *et al.*, 2019), *Elaeocarpus prunifilius* (Iralu & Upadhaya, 2018), *Terminalia bellerica* (Kuniyal *et al.*, 2013) et *Hyptis suaveolens* (Mandal *et al.*, 2008).

Cependant, il a été étonnant de constater que chez *Parkia biglobosa*, ce sont les petites et moyennes graines qui ont montré une germination précoce et rapide. Elles ont donné les meilleurs taux de germination. Ce fait est certainement dû à la rigidité de la coque qui est plus prononcée et intense chez les graines de grande taille par rapport aux plus petites. Cette coque inhibe le débourrement du tégument. Plus la graine est grosse, plus la coque est également épaisse et rigide. Elle doit être fragilisée au préalable par des traitements (trempage à l'eau chaude ou à l'eau tiède pendant longtemps, acide sulfurique, sciage de coque etc.) pour faciliter la levée de dormance. Dans notre étude, nous n'avons pas utiliser de traitements de ce genre, afin d'être le plus proche possible de la nature, d'appréhender le comportement authentique (original) et les possibilités de domestication des espèces cibles. Nos résultats sont en accord avec ceux publiés chez *Copaifera langsdorffii* (Souza & Fagundes, 2014). Ils ont rapporté que les plus petites graines ont montré une germination plus rapide et importante que les plus grandes. Par conséquent, nos résultats sur l'espèce *Parkia biglobosa* n'étaient pas surprenants.

Ces comportements contrastés des espèces sont bien connus chez les espèces d'arbres. Ils sont à la base des stratégies des espèces pour leur régénération, attitudes à la propagation et leur colonisation précoce d'une zone (Burslem & Miller, 2001 ; Iralu & Upadhaya, 2018). Cependant, de façon générale, nos résultats ne confirment pas ceux de Agboola (1996) et de

Mtambalika *et al.* (2014), qui n'ont trouvé aucun effet du poids et de la forme des graines sur le taux de germination chez *Terminalia superba*, *Terminalia ivorensis*, *Gmelina arborea* et *Azelia quanzensis*.

Le taux de germination élevé chez les espèces *Khaya senegalensis* et *Parkia biglobosa*, obtenu à Korhogo par rapport à Daloa pourrait être dû à une température plus élevée à Korhogo, proche de 32°C (26,6-35,7°C). En effet, cette température est considérée comme optimale pour la germination des graines chez les espèces arborescentes (Simão & Takaki, 2008 ; Vargas-Figueroa & Torres-González, 2018).

Finalement, les meilleurs taux de germination trouvés pour les grosses graines étaient élevés, compris entre 71% et 100%. Ces taux étaient presque identiques à ceux obtenus chez *Mansonia altissima*, *Pterygota macrocarpa* et *Terminalia superba* dans les mêmes conditions à Daloa (Akaffou *et al.*, 2019). Par contre, ces taux étaient supérieurs au double de ceux enregistrés chez d'autres espèces d'arbres telles que, *Ceiba pentadra*, *Delonix regia*, *Sterculia urens*, *Albizia lebbek* et *Leucaena leucophala* (Nakar & Jadeja, 2014). En effet, les taux de germination chez ces espèces étaient plus faibles avec tout au plus 30% de taux de germination (Nakar & Jadeja, 2014).

8.1.2. Croissance et biomasse chez les espèces cibles

L'analyse de la croissance a révélé que les plantules issues de grosses graines, aussi bien chez *Khaya senegalensis*, que chez *Pterocarpus erinaceus* et *Parkia biglobosa*, présentaient les meilleures vigueur et performances de croissance. Cela est le fait de la grande réserve d'amidon que contenait ces graines par rapport aux petites. En effet, plus la graine est grande et lourde, plus la plantule qui en est issue a de grandes probabilités d'être épanouie et bien développée. Cette plantule utilise la réserve pour son expansion sur un temps long, causant l'épanouissement de ces organes avec un temps d'adaptation à l'environnement plus court. Chez les graines de petite taille, la réserve étant petite, les plantules utilisent la réserve sur un court moment, causant des formes d'organes plus petites et limitées d'expansions. Cependant, cette capacité disparaît plus tard sous l'effet de l'intensité de l'activité photosynthétique des feuilles et des conditions pédoclimatiques locales. Les grosses graines produisent donc des semis vigoureux avec de grandes expansions d'organes quelque soit l'espèce. Nos résultats sont conformes aux conclusions de Ellis (1992), Milberg & Lamont (1997), Mtambalika *et al.* (2014) et de Deb & Sundriyal (2017). Ces auteurs ont affirmé que la meilleure croissance des plantules

issues de grosses graines devrait être due à une utilisation efficace des ressources plus importantes stockées dans ces graines.

Étant donné que chez *Parkia biglobosa*, les meilleures performances de croissance ont été enregistrées chez les plantules issues de grosses graines, alors qu'elles présentaient un faible taux de germination (50%), les grosses graines peuvent donc être fiables pour l'optimisation de la culture de cette espèce. Ces résultats sont identiques aux études de Fredrick *et al.*, (2017). Mais dans les études de ces auteurs ont appliqué des traitements de scarification de coques des graines et de pré-trempe dans de l'eau tiède et chaude afin d'augmenter le taux de germination des graines (Fredrick *et al.*, 2017).

En outre, les meilleures performances de croissance de plantules enregistrées à Daloa par rapport à Korhogo, pourraient être attribuée aux conditions climatiques plus favorables à Daloa. En effet à Daloa les précipitations sont plus importantes (1300 mm) contrairement à Korhogo (1000 mm). En plus, la température est moins chaude (26°C à Daloa contre 30°C à Korhogo). Ces faits pourraient également s'expliquer par le type de terreau local utilisé. En effet, Daloa étant une zone de transition forêt-savane, les sols semblent plus riches que ceux de Korhogo, qui sont moins fertiles (Hérault *et al.*, 2020).

8.2. Développement architectural chez les espèces cibles

L'analyse rétrospective a permis, de reconnaître, d'identifier et de caractériser des signatures (marqueurs) architecturales chez les espèces cibles dans deux habitats, le long d'un gradient bioclimatique Sud-Nord. Il ressort de cette analyse que ces marqueurs varient d'une localité à une autre. Ils sont influencés par l'âge des individus, contrairement à l'habitat. Sur la base des observations et des indices de développement favorables calculés, ces marqueurs ont permis d'apprécier le développement des espèces cibles. Ainsi, chez *Khaya senegalensis* et *Pterocarpus erinaceus*, les zones de culture favorables identifiées ont été Katiola, Bouaké et Toumodi. Chez *Parkia biglobosa*, ces zones sont, Korhogo, Katiola et Bouaké. Ces marqueurs architecturaux sont des outils précieux pour l'optimisation de la culture des espèces. Ils pourraient aider à sélectionner des génotypes résilients et plusieurs autres zones de culture pour la réussite du reboisement et dans la régénération de la forêt en Côte d'Ivoire.

L'analyse rétrospective a permis d'établir l'unité architecturale et les stratégies de développement architectural des espèces cibles. Ces résultats sont une première chez ces espèces. *Khaya senegalensis* est un arbre qui suit le modèle architectural de Rauh avec 5 ordres de ramification et 4 catégories d'axe. Par contre, *Pterocarpus erinaceus* et *Parkia biglobosa*

possèdent jusqu'à 6 ordres de ramification à cause de plusieurs structures sympodiales réitérées formant des arceaux. Leurs unités architecturales sont constituées de 3 catégories d'axe. *Pterocarpus erinaceus* suit le modèle architectural de Troll ; alors que *Parkia biglobosa* suit le modèle architectural de Champagnat au stade jeune et transite ensuite au modèle architectural de Troll au stade adulte et vieux.

L'ontogenèse des 3 espèces se déroule en 4 phases : 1) initiation du développement et établissement de la couronne (jeune) ; 2) floraison et établissement de l'unité architecturale (jeune-adulte) ; 3) duplication de l'unité l'architecturale par des réitérations totales (Mature) et 4) apparitions de multiples réitérations partielles et d'élagages (sénescence). Cette organisation architecturale moyenne spécifique (unité architecturale) constitue le portrait-robot des espèces cibles. Ces portraits sont leur expression architecturale les différenciant visuellement d'une autre espèce. Elle peut être utilisée pour suivre la phénologie, la santé et la production des espèces cibles en agroforesterie et gestion de système de culture durable (conduite culturale).

8.2.1. Variation des marqueurs primaires de croissance

Nous avons vu que les marqueurs architecturaux identifiés chez les trois espèces (arrêts de croissance, nombre de phytomère par unité de croissance, longueur et diamètre moyen des unités de croissance) varient selon les conditions environnementales et l'âge des individus échantonnés. Ce fait pourrait s'expliquer par la différence de provenance génotypique créée par chaque biotope considéré. Cela paraît normal, puisque la variance environnementale a une influence sur la mise en place et la construction des entités botaniques (nombre et forme des organes). Chaque localité et habitat (sous-bois et plein soleil) génèrent des génotypes adaptés et liés à l'environnement imposé. Le développement (structure squelettique) et la croissance d'un individu sont synergiquement dépendant du génome et de l'environnement. Les expressions des gènes donnent des aspects et formes différentes selon le milieu présent. Les indices de développement favorable calculés ont indiqué des zones propices et permis d'affirmer le choix de ces marqueurs comme outils importants de reboisement. En effet, pour une même espèce donnée, les différents aspects (taille, morphologie expression, etc.) dans différents environnements dû aux stress biotiques et/ou abiotiques peuvent donner des pistes d'orientation et de réponse pouvant permettre de valider, de confirmer, de guider et/ou de choisir des génotypes idéaux de culture. Ces génotypes idéaux évoluant dans des environnements spécifiques peuvent orienter à leur tour, sur le choix de milieux (localités) tolérants et favorables au bon fonctionnement et développement de culture (implantation de

parcelles). L'utilisation de marqueurs architecturaux comme outils importants de sélection pour les forestiers a été également développée dans les études de Sabatier *et al.* (2014).

Nos résultats ont montré que les arrêts de croissance et le nombre de phytomère par unité de croissance varient d'un habitat à un autre chez *Khaya senegalensis* et *Pterocarpus erinaceus*. Cette variation est dû aux conditions environnementales spécifique présentes. En effet, la disponibilité des réssources lumineuses pour l'activités trophique est différente d'un habitat à un autre. Ces résultats sont en parfaite adéquation avec ceux de Nicolini & Caraglio (1994) et de Nicolini (2000). Les individus de sous-bois ont développé de grand nombre d'arrêts de croissance et de phytomères par unité de croissance. Ces indices signifieraient que l'habitat sous-bois provoque des difficultés de développement chez les individus cibles. Cette difficulté pourrait être dû au manque de lumière (ombrage excessif) qui ne favorise pas l'épanouissement et l'expansion des orgnaes (Calonnec, 2013). Ce fait pourrait également être dû, à l'humidité ambiante qui favorise l'abondance et l'installation de laves et d'insecte nuisibles (biotope préféré par de nombreux insectes foreurs et broyeurs) qui attaques très souvent l'apex des tiges (nouvelles pousses débourrées). L'indisponibilité de la lumière dans cet habitat, oblige le méristème à arrêter sa croissance à chaque court et petit temps de fonctionnement. Ce qui génère de nombreux arrêts de croissance de petites tailles. Les arrêts de croissance dans la construction d'un axe feuillé par le méristème freinent l'élan du développement de la pousse. Ce frein traduit directement des difficultés de croissance dans le milieu (stress, traumat, attaques biotiques, etc.). Plus les arrêts de croissance sont répétitifs le long de l'axe, moins la plante est épanouie. Dans ces cas, les individus peine à se développer et à produire des entités de reproduction fiables. En revanche, lorsque les arrêts de croissance sont en nombre réduits, le long d'un axe, ce caractère indique un développement harmonieux et une croissance épanouie. A cet effet, l'habitat sous-bois ne peut être recommandé pour une optimisation de la réussite de culture à base de ces espèces.

Toutefois, fort est de remarquer que chez l'espèce *Parkia biglobosa*, ces marqueurs restent statistiquement invariables dans les habitats observés. Ce fait pourrait s'expliquer par la tolérance de l'espèce à plusieurs environnements et à sa capacité d'adaptation remarquable à différents types d'habitats. Cet incident à été confirmé par les études de Nicolini *et al.* (2012) sur une espèce du même genre (*Parkia velutina*). Ils ont rapporté que la majorité des individus (8/14 individus observés) de cette espèce ont des marqueurs morphologiques et macro-anatomiques invariables dans presque tous les milieux observés. Contrairement aux études de

Nicolini & Caraglio (1994) chez l'espèce *Fagus sylvatica*, cette observation chez le genre *Parkia* pourrait s'expliquer par une forte et rapide adaptation à un environnement nouveau.

L'étude a montré que la morphologie des marqueurs varie d'une localité à une autre. Cette variabilité morphologique des marqueurs n'apparaît pas comme une surprise, puisque chaque localité est une zone pédoclimatique spécifique ayant ses propres caractéristiques (climat, pluviométrie, sol, température etc.). De plus, les localités ont été choisies selon un gradient bioécologie décroissant de savane susceptible d'abriter des populations de ces espèces. Nos résultats sont comparables à ceux de Sabatier (1999), Soloviev *et al.* (2004), Assogbadjo *et al.* (2006), Lauri *et al.* (2010) et de Calonnec (2013). Pour ces auteurs les caractéristiques telles que la profondeur et la fertilité du sol, le climat, la température, la pluviométrie, le gradient écologique etc. sont à la base des différences morphologies entre les individus, d'une zone à une autre. Par conséquent, les zones favorables de culture indiquées par les indices calculées chez *Khaya senegalensis* (Katiola, Toumodi et Bouaké), chez *Pterocarpus erinaceus* (Bouaké et Toumodi) et chez *Parkia biglobosa* (Korhogo, Katiola et Bouaké) sont les zones compatibles et tolérantes à une rapide et bonne réussite de culture (agroforesterie et reboisement) à base de ces espèces. Toute fois, une maximisation du nombre de localités vers d'autres régions et l'identification d'autres zones favorables pourraient contribuer à garantir la régénération des peuplements de ces espèces.

8.2.2. Unité architecturale et caractéristiques architecturales des espèces cibles

Rappelons qu'au moyen d'analyse architecturale, nous avons décrit et mis en évidence les stratégies et modalités de développement et de croissance chez les espèces cibles. Les traits architecturaux (unité architecturale et caractéristiques architecturales) établis sont les premiers chez ces espèces. Elles peuvent servir de base de guide pour des diagnostics de santé (état de dépérissement), phénologie, production, reproduction et de conduite culturale. Elles apparaissent donc importantes et nécessaires dans les types d'association culturale (systèmes agroforestiers) (Sabatier *et al.*, 2014).

Chez *Khaya senegalensis*, 4 catégories d'axes ont été révélées. Cependant, 3 catégories d'axes ont été trouvées chez *Pterocarpus erinaceus* et *Parkia biglobosa*. Ces nombres de catégories d'axe sont dûs aux stratégies de développement architecturale propres et caractéristiques de chaque espèce cible (Sabatier, 1999 ; Hallé & Keller, 2019). En effet, l'unité et le modèle architectural reste unique et spécifique pour une espèce donnée. Elle est l'expression ultime de son génome en interaction étroite avec son biotope (Barthélémy *et al.*,

1989). Même si elle varie très peu souvent d'un environnement à un autre, elle est intrinsèque à la plante, unique et reste inchangée dans l'ensemble, quelque soit le milieu imposé (Edelin, 1977). Ces résultats sont presque similaires à ceux obtenus chez des arbres tropicaux tel que, l'*Acacia mangium* avec un modèle architectural d'Attims et *Tectona grandis* avec un modèle architectural de Massart (Leroy, 2005). Les 4 catégories d'axes trouvés chez l'*Acacia mangium* sont le tronc (durée de vie longue), les branches (durée de vie longue), rameaux (durée de vie moyenne) et ramilles (durée de vie courte). Chez *Tectona grandis*, les catégories d'axes ont été le tronc (durée de vie longue), les branches (durée de vie longue), les rameaux longs (durée de vie moyenne) et les rameaux courts (durée de vie très courte). Par contre, chez les arbres des zones tempérées, ces catégories d'axes peuvent aller jusqu'à 5 (Barthélémy & Caraglio, 2007). C'est le cas du Peuplier dont les catégories sont le tronc (durée de vie longue), les branches (durée de vie de 15 ans), les rameaux (durée de vie de 8 ans), ramilles (durée de vie moyenne de 4 ans) et les rameaux courts (durée de vie moyenne de 2 ans) (De Reffye *et al.*, 2018). Dans notre étude, nous n'avons pas pu déterminer la durée de vie des catégories d'axe, en raison du temps imparti (moins de 4 ans). Ce que nous envisageons effectuer, car cela pourrait orienter des études de conduites sylvicoles (élagage naturel et artificiel) de ces espèces dans des systèmes agroforestiers.

Nous avons révélé les caractères architecturaux de *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* et *Parkia biglobosa*. Ces caractères constituent leurs portrait-robot qui les différencient visuellement les unes des autres sans suivi. Ces caractères sont des informations nouvelles, très importantes pour leur gestion durable. Ils pourraient permettre d'ouvrir des perspectives de recherche sur l'optimisation de leur culture. Leur phénologie, reproduction, production en rendement et exploitation durable dans divers conditions pédo-climatique dépendent de leurs caractères naturels et de la santé de leur unité architecturale. Ainsi, les unités architecturales identifiées pour chacune des espèces cible serviront de base pour le contrôle de leur bien être dans des systèmes de cultures, pour l'appréhension des effets de stress (traumatise) du au changement climatique et pour la prise de décision, notamment sur les conduites d'exploitation efficace, tout en tenant compte des besoins d'usages urgentes (Produits ligneux et non ligneux). En effet, Chaque plante suit une succession d'étapes de développement morphologique tout au long de sa vie avec une séquence précise et ordonnée par différentes entités élémentaires : phytomère, unité de croissance et/ou pousse annuelle (Barthelemy & Caraglio, 2007). La description de cette séquence de développement permet de comprendre les phénomènes biologiques qui lui ont donné naissance et de traduit l'aspect non linéaire de leurs

dynamiques de réaction face aux stress (Sabatier *et al.*, 2014). Ce qui est primordial pour une gestion efficace et durable. La détermination d'unité et de caractéristiques architecturales a constitué le guide de base de gestion durable de plusieurs plantes d'intérêts agronomiques et forestières en Europe et en Amérique du Sud. Si elle est intégrée dans les programmes d'aménagement forestier et les systèmes de culture mixtes en Afrique et particulièrement en Côte d'Ivoire, elle peut contribuer énormément à résoudre le problème du changement climatique, de la sauvegarde de biodiversité et même de la sécurité alimentaire à court, moyen et long terme. Le cas d'optimisation de rendement de plantes agronomiques comme, le Pommier, l'Olivier, le Cacaoyer, le Caféier et la Vigne, puis de plantes forestières telles que le Teck, le Frêne commun, le Noyer commun, le Pin, le Chêne, Erable à sucre, le Hêtre et le Merisier en témoigne beaucoup (Carella *et al.*, 2022 ; Tondjo *et al.*, 2018 ; Rosati *et al.*, 2017 ; Taugourdeau *et al.*, 2012 ; Lauri *et al.*, 2010 ; Nicolini, 2000 ; Sabatier, 1999 ; Nicolini & Caraglio, 1994 ; Fournier, 1989).

Puisque, l'agencement de la structure arborescente globale (architecture) dans un écosystème est fonction de son génome et de son interaction avec les individus environnants, sa connaissance est utile et d'un intérêt capital pour sa culture dans un système mixte et/ou homogène (Anest *et al.*, 2021 ; Leroy, 2005). En effet, la production de fruit et/ou de bois de qualité est optimisée par l'appréhension de types d'expressions architecturales en réponse aux interactions intra et interspécifiques de l'habitat local (Anest *et al.*, 2021). D'ailleurs, cela a été démontré chez plusieurs plantes, comme le Cacaoyer (Tovar *et al.*, 2022), l'Olivier (Carella *et al.*, 2022 ; Rosati *et al.*, 2017 ; 2013), le Pommier (Lauri *et al.*, 2010), le Teck et l'Acacia (Leroy, 2005), le Noyer commun (Sabatier, 1999), pour ne citer que ceux-là.

Comme chez de nombreuses espèces forestières, la séquence du développement architectural se résume, au jeune arbre qui développe sa cime pour ensuite établit son unité architecturale au stade adulte, suivi des processus de duplication (réitération différée) et de régression progressive de la cime au stade vieux (Hallé *et al.*, 1978) ; les résultats ont montré que les trois espèces cibles étudiées suivent le même cheminement près.

Khaya senegalensis montre un développement monopodial comme chez certaines espèces étudiées par Barthélémy *et al.* (1997) et Nicolini (1997). L'architecture de *Khaya senegalensis* à un tronc à croissance vertical avec une ramification rythmique et diffuse. Les branches sont souvent disposées en verticilles. La sexualité est latérale et n'a aucun effet sur la croissance ; le fonctionnement des méristèmes est continu. *Khaya senegalensis* appartient à la famille des Meliaceae et selon Hallé & Keller (2019), les espèces de la famille des Meliaceae

comme l’Acajou, le Mahogany, le Tiama, le Sipo etc., suivent les mêmes modalités de développement (Modèle de Rauh). Selon ces auteurs, ce modèle est l’un des mieux représentés dans les flores tropicales et tempérées actuelles. On le trouve chez les fougères, les lianes et même dans trois familles de Gymnospermes actuelles (Araucariaceae, Pinaceae et Podocarpaceae). Ce modèle à un seul représentant chez les Monocotylédones (*Freycinetia hydra*) et apparaît dans plus de 40 familles chez les Dicotylédones. Ce mode de développement architectural confère à *Khaya senegalensis* un fut bien droit et bien érigé convoité par les exploitant forestiers et ébénistes. L’arbre exprime mieux son architecture dans des conditions non contraignantes et épanouies. Cependant, dans des conditions stressantes, l’architecture est perturbée et modifiée par la fabrication de fourches (relais). Cela affecte gravement la qualité du bois recherché. Il faudrait en tenir compte dans un système agroforestier (type d’association et densité optimale) afin d’en tirer profit.

Pterocarpus erinaceus et *Parkia biglobosa* montrent des développements sympodiaux. Ce type de grandes étapes morphologiques de différenciation architecturale a été observé et étudié chez d’autres plantes forestières d’importance agronomique (Barthélémy, 1988 ; Sabatier, 1999 ; Taugourdeau *et al.*, 2012). La différenciation de l’architecture sympodiale s’effectue de manière progressive. Les axes feuillés se superposent indéfiniment par étapes de façon horizontale et la croissance secondaire redresse verticalement la tige (pseudomonopode). Les structures sympodiaux se forment par superposition et sans direction fixe de croissance dans la cime de l’arbre. Cela confère à ce type de plante, le statut de plante coloniale, car elles arrivent à prendre le dessus sur les autres espèces immédiatement environnantes. Cette stratégie de croissance est mauvaise pour la qualité du bois mais meilleure pour la production de fruit. En effet, les structures sympodiales successives en arceaux (empilements) ont plus de rôle de production (cauliflorie) que de rôle d’exploitation (production végétative) (Barthelemy & Caraglio, 2007). Cependant, la recherche et la production de bois de qualité peut être corrigé par un élagage successif.

Ces deux espèces ont un développement architecturale semblable au modèle de Troll. Selon Hallé & Keller (2019), le modèle de Troll est le mieux représenté en nombre d’espèce dans le Règne végétal. Il est marqué par de nombreuses variations : les axes successifs, les feuilles peuvent être distiques ou opposées en spirale, avec des probabilités comparables ; la jeune plante est généralement dressée à sa base et horizontale à son sommet (d’autres peuvent rester dressées en permanence) ; il peut être formé d’une superposition d’axes horizontaux ; il se structure autour d’un axe unique, d’abord feuillé et horizontal, puis se redresse avec la

croissance en diamètre et la chute des feuilles. Ce modèle n'est pas représenté chez les Fougères, ni chez les Gymnospermes, ni chez les Monocotylédones. Plus de 50 familles de Dicotylédones sont concernées par ce modèle. Les espèces des trois familles des Légumineuses sont construites majoritairement, mais non exclusive selon le modèle de Troll (Hallé & Keller, 2019).

En outre, la construction de structures sympodiales produit une cime dense et arrondie compatible à plusieurs cultures agronomiques sciaphiles. Les connaissances architecturales acquises sur ces espèces pourraient être utiles pour optimiser leur culture en Côte d'Ivoire.

8.3. Modélisation structure-fonction des espèces cibles

Cette section a permis de modéliser le fonctionnement des espèces cibles. Dans un premier temps, les résultats ont montré qu'il est possible de caractériser le fonctionnement des méristèmes sans suivre la croissance des espèces. Les distributions calculées ont indiqué que dans la construction des axes par les méristèmes, les UC sont préformées dans les bourgeons. Dans la mise en place des UC, le méristème produit immédiatement dans un premier temps un petit nombre de phytomères (préformation) ; après un stade de repos momentané, il allonge l'UC (pousse) en produisant de nouveaux phytomères en nombre plus élevé, dans le prolongement de l'UC (néoformation). Ce phénomène est à l'origine de la grande diversité de taille des individus de la population considérée. Les lois binomiales calculées expriment la variance génétique intrinsèque à une population donnée, et elle peut servir de sélection de population d'individus ayant des caractères appréciables et recherchés. Dans notre cas, les populations d'individus de Daloa sont les meilleurs pour l'optimisation du reboisement à base de ces espèces. Les résultats ont aussi montré que le modèle calcule bien les paramètres de développement topologique et de croissance des espèces par inversion analytique du modèle, ce qui est très rare.

Les équations allométriques permettant des mesures non destructives d'organes chez les espèces cibles sont des méthodes qui allège les travaux de terrain pour les études d'écophysiologie dans les systèmes de cultures agroforestiers. Ces modèles peuvent être appliquée pour estimer la biomasse des organes et la surface foliaire chez des espèces de la même famille que les espèces cibles.

Par ailleurs, la croissance secondaire a été bien calibrée en utilisant la loi de *Pressler*. Ces résultats justifient l'utilisation du pool commun même dans le cas des arbres. L'utilisation

du méta-phytomère (mode phyto-Facto) pour les arbres à UC simplifie et accélère le calcul de la croissance. L'utilisation du mode matriciel, qui décompose l'architecture en parties distinctes, permet de résoudre les relations source-puits tout en conservant la notion d'axe. Le profil du tronc est ainsi préservé, ce qui est important en sylviculture. Le développement topologique et la production de biomasse des arbres d'un peuplement sont des processus largement stochastiques plutôt que déterministes. L'approche stochastique utilisée dans notre étude doit être prise en compte dans les modèles de production et d'allocation de la biomasse.

8.3.1. Modélisation du fonctionnement des méristèmes

Nous avons vu que toutes les unités de croissance (UC) sont préformées par les méristèmes le long des axes, alors qu'une fine partie des phytomères dans les UC sont d'abord préformées et ensuite néoformées avec une loi d'arrêt séparant les deux phénomènes. La néoformation des phytomères dans les unités de croissance augmente avec l'évolution de l'âge physiologique des méristèmes. Le nombre de phytomères préformés étant généralement faible que ceux de la néoformation, la distribution est donc ajustable à une binomiale négative. Les ajustements trouvés expliquent la diversité fonctionnelle et les performances des populations d'individus considérés dans des conditions environnementales données, pour l'ouverture des voies au phénotypage et à la sélection d'idéotypes adaptés (Mialet, 1990).

Dans l'ensemble, les résultats ont montré que les individus élevés à Daloa ont un meilleur fonctionnement méristématique avec de bons ajustements. Les quantités d'organes dans les bourgeons ont été plus nombreuses à Daloa qu'à Korhogo. Ce fait exprime un bon développement des individus à Daloa. Dans cette station, les méristèmes constituent les entités botaniques de façon uniformes (homogène) et épanouis. Cela se constate par le nombre de cycle de développement grand sur un temps relativement court qu'à Korhogo pour une même durée de culture. Ce fait s'explique par la différence du pédoclimat. A Daloa, les sols sont plus fertiles et le climat est favorable au développement qu'à Korhogo, où les sols sont généralement plus pauvres avec un climat plus aride (Silue *et al.*, 2021).

Les paramètres de lois trouvés dans nos résultats sont conformes à plusieurs cas d'études menés sur des espèces tempérées (hêtre, abricotier, noyer etc.) et tropicales (hévée, cacaoyer). Le développement stochastique des unités de croissance chez *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* et *Parkia biglobosa* suit les mêmes lois que celle trouvée respectivement pour le hêtre (Nicolini, 1998), le noyer (Sabatier *et al.*, 1998), et l'hévée (De Reffye *et al.*, 1991b). Quant à la distribution du nombre de phytomères par unité de croissance, les

ajustements sont similaires à ceux de l'abricotier (De Reffye *et al.*, 1991b) et du cacaoyer (Mialet, 1990).

Les résultats ont montré que nos lois étaient binomiales avec des lois d'arrêts dans le cas des lois composées (pré et néoformation dans la construction des phytomères dans les UC). En effet, ce processus de croissance est de même nature chez presque tous les arbres, mais c'est le processus d'arrêt qui change constamment d'une espèce à l'autre. C'est le cas majoritairement chez les arbres des zones tempérées où le processus d'arrêt est directement visible sur l'ajustement (allure bimodale). L'exemple du Merisier et du Peuplier sont des illustrations parfaites (De Reffye *et al.*, 1991b). Cependant, notons que dans tous les cas d'espèces étudiées auparavant, les nombres de phytomères par UC suivent une distribution unimodale ou bimodale. Le cas unimodal correspond à l'allongement d'une partie préformée de l'UC dans le méristème (l'hévéa, le litchi, le hêtre, le marronnier). Les distributions bimodales (peuplier, merisier, abricotier, cacaoyer) proviennent toujours d'une préformation à laquelle succède éventuellement et immédiatement une néoformation qui correspond à la reprise du fonctionnement du méristème, après élongation de la partie préformée. L'arrêt du développement en néoformation dans l'attente d'une reprise de la végétation correspond soit à un repos du méristème chez les arbres à ramification monopodiale (acajou, merisier), soit à un avortement du méristème chez les arbres à ramification sympodiale subterminale (bois de vène, Néré, abricotier).

Nos lois de probabilité trouvées sont caractéristiques d'un processus de renouvellement sur une période fixée avec un phyllochrone (temps entre l'élongation de 2 phytomères successifs) caractérisé par la moyenne et la variance. Toutes les distributions s'ajustent à des lois binomiales de paramètres N , b , avec N qui désigne le temps de développement de l'UC en cycle de développement (CD) et b qui est la probabilité de réaliser un phytomère à chaque CD (processus de Bernouilli). Ceci indique notamment le temps (vitesse) impati à un méristème pour son fonctionnement. Plus ce temps est court avec un nombre de CD grand, plus le développement est meilleur dans cet environnement. Dans notre cas, ces lois indiquent clairement un bon fonctionnement à Daloa pour les trois espèces cibles. En effet, les résultats ont montré que la préformation diffère d'une station à une autre et était meilleur à la station de Daloa. Cela s'explique par le fait que les conditions écologique et environnementale de cette station sont plus favorables au bon développement des plantes que celle situé en zone aride (Korhogo). Les mêmes constats ont été faits chez le merisier, l'abricotier, le peuplier et le cacaoyer (Chavaneau, 1989 ; Mialet, 1990 ; de Reffye *et al.*, 1991b). Cependant, chez ces

espèces, les distributions étaient des bimodales de nombre de phytomères par UC qui correspondaient à des parties néoformées s'ajustant à des parties préformées selon une certaine fréquence. Leur méristèmes avaient des lois d'arrêt groupées en préformation et dispersée en néoformation. Il est important de noter que quelque soit l'espèce et selon l'âge physiologique du méristème, la partie néoformée peut toujours être présente (le tronc) ou absente (axes courts). Cependant, la proportion d'organe néoformée décroît avec l'augmentation de l'âge physiologique.

Tous ces paramètres de lois binomiales trouvés dans notre étude sont spécifiques d'une espèce d'arbres à une autre. Elles définissent les signatures insinèques de *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* et *Parkia biglobosa*. Comme c'est le cas de l'UC du merisier, $B(12, 0,45)$, $a = 0,85$, $B(20, 0,63)$ (Fournier, 1989) et (de Reffye *et al.*, 1991b), l'UC de l'abricotier, $B(12, 0,46)$, $a = 0,48$, $BN(2, 0,88)$ (Chavaneau, 1989) et (de Reffye *et al.*, 1991b), l'UC du peuplier, $B(12, 0,68)$, $a = 0,86$, $BN(5, 0,76)$ (de Reffye *et al.*, 1991b) et l'UC du cacaoyer, $B(3, 0,72)$, $a = 1$, $BN(2, 0,66)$ (Mialet, 1990) ; pour ne citer que ceux là. Il reste important de noter que quelque soit l'espèce et selon l'âge physiologique du méristème, la partie néoformée peut toujours être présente (le tronc) ou absente (axes courts). Cependant, la proportion d'organe néoformée décroît avec l'augmentation de l'âge physiologique (de Reffye *et al.*, 1991b).

8.3.2. Modélisation du développement des espèces

Pour chaque espèce et dans les deux stations, les résultats ont montré que tous les paramètres de développement topologique calculés et observés sont stables. Ces paramètres de développement peuvent varier d'un environnement à un autre selon les conditions pédoclimatiques ou le stress subit par les peuplements végétaux. Les probabilités de développements des tiges (P) et branches (B) ainsi que le rapport de rythme (W) sont transcrites par la capacité des bourgeons des axes de la plante à émettre ou pas des phytomères (Processus de Bernoulli). Cette capacité donne les différentes tailles d'individus dans une population. Ce processus de Bernoulli est fortement influencé par l'environnement, ce qui permet selon les calculs de la formule décrite en méthodologie, de sélectionner des génotypes désirés pour la bonne culture.

Chez les espèces *Khaya senegalensis* et *Pterocarpus erinaceus*, la majorité de ces paramètres étaient différente d'une station à une autre et meilleur dans la station de Daloa. En fait, la station de Daloa est située dans une zone de transition forêt-savane avec des conditions climatique et pédologique plus favorables au développement. La sylviculture de ces espèces est

plus propice dans cette zone que dans la zone de situation de Korhogo, où les espèces subissent de grand stress hydrique à des températures élevées avec un sol plus pauvre qu'à Daloa.

Chez *Parkia biglobosa*, la majorité des paramètres calculés était presque identiques d'une station à une autre. Cela signifie que cette espèce a une capacité d'adaptation plus grande que les deux autres espèces (Nicolini *et al.*, 2012). Les résultats trouvés sur le Phyllochrone (Temps de fabrication en jour d'un phytomère par les méristèmes) indiquent que les espèces ont du mal à se développer dans la localité de Korhogo (zone sec) par rapport à Daloa (zone humide).

Les espèces fonctionnent plus lentement avec un mauvais développement à Korhogo qu'à Daloa. Cela peut être dû aux conditions pédoclimatiques des stations. Certaines études ont déjà montré l'effet du pédoclimat sur la croissance et le développement de plusieurs plantes (Soloviev *et al.*, 2004 ; Assogbadjo *et al.*, 2006 ; Lauri *et al.*, 2010 ; Calonnec 2013). L'architecture des plantes est le résultat d'effets génotypiques et environnementaux, et le nombre d'organe est fortement influencé par les activités physiologiques de la plante (Buck-Sorlin & Bell, 2000). Les paramètres de développements trouvés dans notre étude sont validés en comparaison aux études de modélisation structurelles et fonctionnelles effectuées dans les mêmes conditions par Kang *et al.*, 2008 ; Letort *et al.*, 2009 et Wang *et al.*, 2011, Diao *et al.*, 2012, Tondjo *et al.*, 2018 et Soualihou *et al.*, 2021.

8.3.3. Modélisation de la croissance chez les espèces cibles

Nous avons étudié le comportement du modèle GreenLab vis-à-vis de *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* et *Parkia biglobosa*. Le modèle a reproduit raisonnablement la cinétique et fidèlement la dynamique de croissance des espèces cibles par deux résultats satisfaisants.

Le premier résultat est que la croissance secondaire est bien calibrée et ajustée par le modèle et par utilisation de la loi de Pressler, stipulant que la surface des anneaux ligneux d'un phytomère est proportionnelle au nombre de feuilles actives vues en amont. Ce résultat important justifie l'utilisation du pool commun chez ces arbres. La réserve nutritionnelle sous forme virtuelle obtenue par l'activité photosynthétique (pool commun) est située dans la couronne (feuillage) et les phytomères situés en dessous du feuillage n'en voient qu'une partie selon l'emplacement (Soualihou *et al.*, 2021 ; Taugourdeau *et al.*, 2013 ; Kang *et al.*, 2008). Les paramètres cachés (source-puit) révélés par le modèle permettent dans un premier temps

de prédire la croissance et le développement future des espèces par simulation (puissance du modèle). Ce modèle est impressionnant, du moment où l'on peut réduire considérablement des travaux fastidieux d'application et de suivi à long terme en agronomie, sylviculture et génétique. Dans un deuxième temps, ces paramètres cachés qui sont intrinsèques à la plante sont peu influençables par l'environnement et donc sont très utiles et important pour l'amélioration génétique dans un cadre d'optimisation de système de culture.

Le deuxième résultat est l'utilisation du méta-phytomère (UC). Les espèces cibles ont une croissance rythmique (UC par UC), ce qui produit un grand nombre de phytomères pour les calculs de la croissance par un ordinateur standard comme le nôtre (mémoire insuffisante). L'utilisation du méta-phytomère simplifie et accélère les calculs (mode Phyto-Facto). Cette méthode résout les relations source-puit quel que soit la taille (âge) de l'arbre en conservant la notion d'axe. Le profil du tronc est ainsi préservé, ce qui est important en agroforesterie et en sylviculture. C'est d'ailleurs, cette méthode qu'a utilisé Taugourdeau *et al.* en 2013 sur l'Erable à sucre au Canada.

Dans notre étude, les analyses de séries organiques ont permis de calculer les paramètres de croissance cachés des espèces. Ces paramètres rendent compte du fonctionnement photosynthétique internes des individus. Ils pourraient être utilisés par les agroforestiers pour prédire à partir de la surface de production, les densités de culture et type d'association puis d'interaction arborescente à base des espèces cibles ; le rendement en biomasse (Carbone) et en bois d'œuvre. Ces paramètres pourraient surtout être utilisés par les généticiens pour l'amélioration des espèces cibles. En effet, la première application du modèle GreenLab est la génétique. Le calibrage de ce modèle sur nos espèces est un premier test qui semble donner bonne impression de réussite. Le modèle se limitait qu'à l'optimisation de rendement et de culture de plantes d'intérêt agronomique (Riz, Maïs, Tomate, Igname, Concombre, Beterave, Carotte, Tournesol, Cacaoyer, Café, Coton etc.). Sur les arbres forestiers, il a été utilisé que sur le l'Eucalyptus, le Teck et l'Erable. Son application sur nos arbres forestiers indigènes ouvre ainsi de grandes perspectives de recherche et d'exploration chez de nombreux arbres forestiers surexploitées et menacées d'extinction par la déforestation et le changement climatique en Côte d'Ivoire et en Afrique. Les paramètres source-puits cachés trouvés sont en parfaite harmonie et en adéquation avec ceux trouvés par Tondjo *et al.* (2018) sur le Teck au Togo, par Diao *et al.* (2012) sur l'Eucalyptus en Chine et Taugourdeau *et al.* (2013) au Canada sur l'Erable à sucre.

Les paramètres fonctionnels optimisés par l'approche multi-fitting a montré que la plupart des paramètres sont stables, ce qui est précieux pour l'amélioration génétique et la

sylviculture. Les résultats ont montré que le rapport poids/surface appelé poids spécifique de la feuille augmentait avec le nombre de feuilles fonctionnelles, ainsi que l'enfoncement de la gaine foliaire. Ce type d'effet n'a pas été pas prévisible par le modèle GreenLab. Ceci fait partir des faiblesses du modèle. Cependant, le modèle a été bien calibré avec les espèces cibles en produisant des paramètres source-puits fiable pour l'optimisation de leur culture. Ces ajustements ont été similaire chez des plants de coton (Zhan *et al.*, 2006), d'érable à sucre (Taugourdeau *et al.*, 2013), de Caféiers (Letort *et al.*, 2012 ; Letort *et al.*, 2020), de Teck (Tondjo *et al.*, 2018). Comme chez ces plantes, le modèle explique bien les relations sources-puits chez les espèces étudiées en ajustant correctement les séries biologiques, prises aussi bien sur un seul plant que sur plusieurs.

L'exemple du teck (Tondjo *et al.*, 2018), du cotonier (Zhan *et al.*, 2006), de l'érable à sucre (Taugourdeau *et al.*, 2013) et du caféiers (Letort *et al.*, 2012), montre bien que le modèle GreenLab construit bien des idéotypes par intégration des connaissances physiologiques à partir des caractéristiques 3D et la génomique fonctionnelle (Paramètres source-puits). Cette stratégie doit être utiliser sur les espèces agroforestières indigènes pour un criblage de génotypes adaptés à l'optimisation des systèmes de culture et d'aménagement forestier en Côte d'Ivoire.

Dans cette étude, le développement de la méthode d'échantillonnage des mesures sur des plantes à architecture stochastique (*Khaya*, *Pterocarpus* et *Parkia*) a été un long processus. Dans un premier temps, la méthode d'analyse des couronnes a fourni les valeurs des paramètres qui contrôlent le développement. Dans un deuxième temps, la méthode des séries organiques couplée à la notion de structure potentielle a fourni les valeurs des paramètres source-puits qui contrôlent la croissance. En général, les plantes ligneuses ont un développement beaucoup plus lent que les plantes herbacées. Aussi, dans la plupart des cas, les mesures ne sont disponibles qu'à une seule date, car Il est rare de pouvoir bénéficier de multi-fitting (multi-ajustement) provenant de données de plusieurs dates pour assurer la stabilité des paramètres. Dans notre étude, cela a été fait à deux dates (1 et 2 ans) à cause de la nature communes des échantillons. Chez les espèces étudiées, les allométries entre la biomasse et les dimensions des organes doivent être prises en compte, car, dans les applications forestières, la forme et les dimensions des axes déterminent en partie leur valeur économique et leur utilisation potentielle. Le calcul de la croissance secondaire doit tenir compte de l'âge physiologique. La méthode de l'élément de cerne d'arbre, qui relie la surface de section d'un cerne d'arbre au nombre de feuilles vues en amont, n'est pas suffisante. Il faut des termes correctifs qui modifient la distribution de la croissance secondaire en fonction de l'âge physiologique (ici l'ordre de ramification). Nous

réitérons le fait que les paramètres source-puits révélés par le modèle permettent de prédire la croissance future sans suivi à long terme. Ce fait est très remarquable et une prouesse pour l'agronomie, la sylviculture et la génétique.

Si l'arbre peut être calculé jusqu'à 80 ans par le modèle GreenLab, et s'il est possible de le démonter et de le visualiser en pièces détachées (détails des axes), son architecture ne peut être simulée car sa structure topologique est trop volumineuse. Cependant, les forestiers sont surtout intéressés par ces axes en parties séparées, y compris le profil des cernes dans le tronc qui peut être fourni par la modélisation GreenLab. Il est important de noter que, le développement topologique et la production de biomasse des arbres d'un peuplement sont des processus largement stochastiques plutôt que déterministes. Donc l'approche stochastique du développement et de la croissance utilisée dans notre étude doit être pris en compte que dans les modèles de production et d'allocation de la biomasse.

Nous rappelons tout de même que, l'application du modèle GreenLab nécessite des plantations monospécifiques, homogènes en termes de sol et de densité avec des plants d'âge pair, ce qui est le plus souvent le cas en agronomie. Si l'analyse de la couronne pour calculer le développement est facile à mettre en œuvre, l'analyse de la série organique est plus délicate. Les arbres monocycliques à UC préformés sont les meilleurs candidats à la modélisation (érables, peupliers, etc.). Les arbres polycycliques avec des UC néoformés (tecks, ormes, acajous, vène, néré etc.) sont beaucoup plus difficiles à traiter, principalement pour des questions d'échantillonnage. Le pire cas est sans doute celui des arbres fruitiers où l'interaction entre le développement et la gravité est évidente et génère de l'épitonie, ce qui rend presque impossible la réalisation d'un échantillon représentatif de mesures.

CONCLUSION, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

Au cours de cette étude, nous avons révélé des informations capitales à l'optimisation de la culture de *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* et *Parkia biglobosa*, à travers une approche couplant la germination, l'architecture et la modélisation. A cet effet, cette étude a montré que les grosses graines de *Khaya senegalensis* et *Pterocarpus erinaceus* sont les mieux indiquées pour une bonne germination. Chez *Parkia biglobosa*, les meilleures capacités germinatives sont générées par les graines de petite (0,04-0,13 g) et moyennes (0,16-0,19 g) tailles. Cependant, les jeunes plants de meilleures performances sont obtenus par la germination des grosses graines pour toutes les espèces cibles. Par conséquent, les semences de bonne qualité pour optimiser la réussite du reboisement à base des espèces cibles sont les graines de grandes tailles (0,25-0,37 g chez *Khaya senegalensis*, 0,08-0,15 g chez *Pterocarpus erinaceus* et 0,2-0,32 g chez *Parkia biglobosa*). Elles peuvent être fournies aux agriculteurs pour aider les programmes d'agroforesterie et de reboisement. L'hypothèse selon laquelle, la taille des graines et l'environnement maternel influencent les performances germinatives et la croissance des plantules est ainsi vérifiée.

Relativement aux marqueurs architecturaux, ils ont permis d'identifier des zones favorables de cultures sur la base d'indices calculés. Ainsi, les localités de Katiola, Bouaké et Toumodi ont été identifiées comme les zones de cultures propices pour les espèces *Khaya senegalensis* et *Pterocarpus erinaceus*. En revanche, chez *Parkia biglobosa*, ces zones sont Korhogo, Katiola et Bouaké. Ces marqueurs sont des outils précieux pour l'optimisation de la culture des espèces cibles. Ils pourraient aider à sélectionner des génotypes résilients pour la réussite du reboisement. La deuxième hypothèse stipulant que, la plasticité des marqueurs architecturaux indique les difficultés de développement et oriente vers le choix d'environnements propices à la culture des espèces cibles est vérifiée.

L'analyse rétrospective a permis d'établir le diagramme et les modèles architecturaux des espèces cibles. *Khaya senegalensis* est un arbre qui suit le modèle architectural de Rauh avec 5 ordres de ramification et 4 catégories d'axe. *Pterocarpus erinaceus* suit le modèle architectural de Troll. Quant à *Parkia biglobosa*, elle suit le modèle architectural de Champagnat au stade jeune et de Troll au stade adulte et vieux. *Pterocarpus erinaceus* et *Parkia biglobosa* ont jusqu'à 6 ordres de ramification à cause de plusieurs structures sympodiales réitérées formant des arceaux. Leur unité architecturale sont constituées de 3 catégories d'axe. L'ontogenèse des 3 espèces se déroule en 4 phases : 1) initiation du développement et établissement de la couronne (jeune) ; 2) floraison et établissement de l'unité architecturale (jeune-adulte) ; 3) duplication de l'unité l'architecturale par des réitérations totales (Mature) et

4) apparitions de multiples réitérations partielles et d'élagages (sénescents). Les stratégies de développement architectural établies pour ces espèces permettront de suivre la phénologie, la santé, la production et la conduite culturale des espèces cibles pour leur gestion durable. Nous avons ainsi vérifié notre troisième hypothèse affirmant que, le diagramme et les caractéristiques architecturales permettent de mieux connaître les espèces cibles.

La modélisation des espèces cibles a permis de comprendre leur fonctionnement et d'établir des paramètres source-puits utiles à leur amélioration génétique. Il est donc possible de caractériser l'activité méristématique sans suivre la croissance par des processus de croissance et d'arrêt, qui sont en réalité des distributions du nombre d'entre-nœuds par UC et d'UC par axe. Les distributions calculées ont indiqué que, dans la construction des axes par les méristèmes, les UCs sont préformées dans les bourgeons (Binomiale positive). Dans la mise en place des UCs, le méristème produit immédiatement un premier lot de phytomère en petit nombre (préformation : Binomiale positive). Ensuite, après un stade de repos momentané (loi de passage a), il produit de nouveaux phytomères en nombre élevé dans le prolongement de l'UC (néoformation : Binomiale négative). Les paramètres des binomiales calculés servent à sélectionner des individus dans une population pour l'optimisation de culture. Les ajustements expliquent la diversité fonctionnelle et les performances des populations d'individus considérés dans des conditions environnementales données, pour l'ouverture des voies au phénotypage et à la sélection d'idéotypes adaptés.

Les résultats ont aussi montré que les paramètres de développement et de croissance sont stables et bien ajustés par le modèle. Les paramètres qui gouvernent le développement permettent d'explorer les liens entre l'environnement et la structure des plantes. Le modèle GreenLab a reproduit raisonnablement la cinétique et fidèlement la dynamique de croissance des espèces cibles. Il a également aidé à comprendre le fonctionnement des espèces cibles et permis d'établir des paramètres source-puits nécessaires à l'optimisation de leur culture et à leur amélioration génétique. Ces paramètres source-puits révélés par le modèle permettent de prédire la croissance future et le rendement sans suivi à long terme. Ils conditionnent la bonne culture, la production à long terme et la répartition de la biomasse dans les compartiments de la plante. Ce résultat est d'un intérêt capital pour le phénotypage lié à la sélection et à l'optimisation d'itinéraires culturaux (densité, irrigation, etc), où la simulation peut jouer un rôle essentiel. Les paramètres fonctionnels optimisés par l'approche multi-fitting indiquent une grande stabilité des paramètres cachés. Ce fait est précieux pour l'amélioration génétique et l'optimisation des systèmes de cultures. De plus, une sélection génétique basée sur les

paramètres cachés du modèle, estimés par méthode inverse, pourrait fournir de nouveaux QTLs d'intérêt, potentiellement plus stables sous différents environnements que ceux obtenus à partir des traits phénotypiques directement. Cette approche ouvre des perspectives nouvelles pour l'amélioration de ces espèces.

Le développement a été calculé grâce au processus de Montecarlo et des chaînes de Markov, tandis que la croissance secondaire (source et puits) a été calibrée avec la loi de *Pressler* à l'aide de la méthode des moindres carrés généralisés. Les lois d'activités méristématiques couplées aux puits des organes (D : Demande), à la photosynthèse (Q : Offre) et aux séries organiques (Q/D : Croissance et l'expansion d'organe des lois Bêta), ont permis de simuler l'architecture des espèces en imagerie de synthèse (3 dimensions). Cette étude n'inclut pas le système racinaire et la fructification, qui n'étaient pas disponibles. En supposant que la part allouée au système racinaire serait proportionnelle à la biomasse totale produite et que la fructification au niveau de l'UC serait proportionnelle à son poids, leur négation n'implique qu'une surestimation de la valeur du paramètre r (Résistance ou efficacité climatique). Cette étude apporte des éléments utiles à la gestion durable des espèces cibles. Ils permettent d'aboutir à un modèle de plante computationnelle adaptées aux besoins de la sylviculture sous un nouvel angle, puis d'envisager de nouvelles applications agronomiques et forestières en Côte d'Ivoire. Notre quatrième hypothèse selon laquelle, le model GreenLab calibre bien sur les espèces cibles et fourni les paramètres source-puits permettant de simuler l'architecture des espèces cibles est ainsi vérifiée.

Notons que le concept d'architecture des plantes est un atout nouveau en agronomie et en foresterie pour améliorer les méthodes en sélection végétale grâce à l'apport de nouveaux paramètres et en optimisation des systèmes de cultures (densité, irrigation, itinéraire, etc.), à travers l'efficacité des modèles dynamiques. Ce travail fournit des éléments utiles et non développés sur ces espèces à ce jour. Ces résultats constituent des outils d'aides importants pouvant aider à la gestion durable et à l'optimisation de la culture des espèces cibles. Ils peuvent aussi servir de base de restructuration de la politique de régénération de la forêt en Côte d'Ivoire.

Au vu des résultats de cette étude, des recommandations à l'endroit des autorités et structures en charge de la gestion du patrimoine forestier ivoirien (SODEFOR, Eaux et Forêts, OIPR), ainsi qu'à l'endroit des particuliers de tout genre (agriculteurs, coopératives, ONG, etc.) sont nécessaires.

-En ce qui concerne l'obtention de semence de qualité et des plantules vigoureuses chez les espèces cibles, nous recommandons de trier les semences et de porter le choix essentiellement sur les graines de grande taille.

-Nous leur recommandons d'intégrer l'analyse architecturale dans les programmes d'aménagement forestier et de systèmes de culture à long terme. Cette analyse pourrait aider dans les diagnostics de base d'exploitation et de gestion durable des espèces menacées dans les aires protégées (parcs et réserves), puis dans les bilans de contrôle d'aménagements forestiers mis en place.

-Nous recommandons de prendre en compte les interprétations des marqueurs architecturaux (variations vis-à-vis d'un pédoclimat changeant) dans la gestion des systèmes de culture. Cette interprétation aidera à identifier des milieux de culture favorable et des génotypes performants pour l'installation de parcelles en agroforesterie et la reforestation). Nous leur recommandons également de les impliquer dans les réponses aux questionnements liés à la gestion des ressources phyto-génétiques pour la régénération de la forêt en Côte d'Ivoire.

- Nous recommandons de s'intéresser aux modèles de fonctionnement des plantes à travers les paramètres source-puits pour une agriculture de précision. Cela permettra de prédire les rendements, de sélectionner des idéo-types adaptés, de réduire les travaux de terrain et d'optimiser les systèmes de culture.

A l'endroit de la communauté scientifique, nous recommandons les modèles à cohorte (passage de Crop modèle au FSPM), comme le modèle GreenLab. En effet, ce modèle GreenLab nécessite une attention particulière du fait qu'il :

-est étroitement lié à la génétique (Outils de sélection), car il fournit de nouveaux paramètres (développement et croissance) qui sont des composantes de la production de biomasse et de sa répartition dans la plante, autrement dit du rendement ;

-a un grand pouvoir d'identification et de séparation des espèces et variétés, à l'aide de la précision sur les paramètres estimés à partir des échantillons prélevés sur les cimes et les séries organiques (statistiques) ;

-est important en foresterie, car il permet de visualiser directement le profil d'un tronc avec ses cerne, sans représenter l'architecture de l'arbre ; d'étudier la mécanique de l'arbre et la qualité du bois sur pied selon des scénarios sylvicoles ;

-a une grande dimension en écologie, car il est porteur d'économie de traitement (eau, engrais, etc.), préservant ainsi l'environnement grâce à l'optimisation.

A l'issue de cette étude, plusieurs perspectives sont envisageables selon les problématiques abordées et appliquées.

Dans un premier temps, il faudrait des tests de germination selon différentes provenances afin de sélectionner les meilleures provenances pour des propositions en agroforesterie et reboisement. Cette série de tests limitera le matériel tout venant. Aussi, il faudrait des essais multi-locaux et/ou zones par catégorie de taille de graine afin de valider le choix des grosses graines comme étant des semences de qualité. Il faudrait par ailleurs appliquer des tests de prétraitements (trempage à l'eau tiède ou chaude, acide sulfurique, scillage de coque etc.) pour lever la dormance des grosses graines chez *Parkia biglobosa*. Cette application améliorera les performances germinatives des grosses graines chez cette espèce. Dans un second temps, il faudrait associer les paramètres de viabilité et de vigueur pour sélectionner des génotypes performants pour les programmes de reboisement et d'agroforesterie.

Relativement à l'étude architecturale, il serait envisageable de planter des clones de génotype le long du gradient bioclimatique défini, afin de mieux comprendre et/ou approfondir les modalités de construction structurale, puis d'appréhender les effets de l'environnement sur l'architecture des espèces cibles. Aussi, il faudrait réellement se pencher sur l'étude de la durée de vie des catégories d'axes. Cette étude aboutira à la connaissance du temps d'élitage naturel de celle-ci et de la prédiction de l'âge de production et de récolte du bois puis des fruits. La prédiction du temps et/ou de l'âge de récolte du bois et des fruits est nécessaire à la gestion durable des espèces cibles.

Pour la modélisation, une prise en compte des ramifications d'ordres supérieurs aux branches A2 (rameaux A3, radicelles A4, A5 et A6) sur des individus plus âgés (> à 2 ans) serait nécessaire. Il faudrait poursuivre les études sur d'autres catégories d'axes afin d'obtenir leurs paramètres cachés (source-puits). En effet, la connaissance des forces de puits de ces catégories d'axes permettra d'apprécier la conduite sylvicole (type d'élagages d'axes) selon le rendement et la productivité recherchée (volume de bois de qualité du tronc et/ou de quantité de fruit des rameaux). L'obtention des paramètres source-puits permettra également de simuler l'architecture arborescente des espèces au moins jusqu'à 30 ans, identifier des itinéraires culturels appropriés, consolider des types d'associations culturale en agroforesterie et estimer la quantité de fût (bois) exploitable (âge idéal pour l'obtention d'individus commercialisables).

Aussi, la prise en compte d'axes d'ordre de ramification supérieure à ceux utilisés dans cette étude pourrait permettre d'établir la densité de culture exacte (distance entre ligne et sur ligne) de ces espèces en milieu réel (champ). Il faudrait inclure la fructification à l'étude architecturale pour estimer le rendement optimal selon le type de conduite culturale. La prise en compte du système racinaire est importante, du moment où elle permettra d'établir les relations force de puit racine-système aérien, puis les puits fantômes (lien entre la biomasse racinaire nécessaire pour une bonne production optimale du système aérien ou vice versa). La notion de puit fantôme est le fait de prédire et d'obtenir le rendement en biomasse souhaitée en analysant simplement l'architecture de la plante. Cette technique pourra être très bénéfique par exemple sur les cultures géophytes de type agronomique, telle que l'igname, le manioc, la patate, la pomme de terre, etc.

REFERENCES

- Aborisade C.A., Bakare L.M. & Balogun F.O. (2021). Elemental characterization of African locust beans (*Parkia biglobosa*) in Igbope, Oyo State of Nigeria. *Asian Journal of Applied Sciences*, 9(2) : 127-132.
- Adji B.I., Yao K.A.G., Gore bi B.N., Kadio G.A., Gbotto A.A., Assiri A.A. & Akaffou D.S. (2020a). Identification des pratiques et types de systèmes agroforestiers à base de cacaoyers (*Theobroma cacao* L.) dans les trois principales zones de production de cacao en Côte d'Ivoire. *Agronomie Africaine*, 32 (3) : 323 - 342.
- Adjonou K., Houetcheignon T., Rabiou H., Kossi S.N., Abotsi E.K., Johnson B.N., Alaba P., Ouinsavi C.A.N., Quashie A.M.L. & Kokutse A.D. (2018). Challenges of conservation and sustainable management of African rosewood (*Pterocarpus erinaceus*) in West Africa. *Natural Resources Management and Biological Sciences*, 29 : 21-34. <https://doi.org/10.5772/intechopen.88796>
- Agboola D.A. (1996). The effect of seed size on germination and seedling growth of three tropical tree species. *Journal of Tropical Forest Science on JSTOR*, 9 (1) : 44-51.
- Ahmed M.U., Modibbo A.A., Zaruwa M.Z. & Sudi I.Y. (2017). Phytochemical and Nutrient Composition of *Pterocarpus erinaceus* Stem Bark. *International Journal of Biochemistry Research & Review*, 19 (2) : 1-6. DOI: 10.9734/IJBCRR/2017/36546
- Ajiboye A.E. & Hamed B.A. (2020). Antimicrobial activity of the crude extracts of *Parkia biglobosa* (Jacq) seeds on selected clinical isolates. *Journal of Biological Research and Biotechnology*, 18 (2) : 1135-1146.
- Akaffou D.S., Kouamé K.A., Gore B.B.N. Abessika Y.G. Kouassi K.H. Hamon P., Sabatier S. & Duminil J. (2019). Effect of the seeds provenance and treatment on the germination rate and plants growth of four forest trees species of Côte d'Ivoire. *Journal of Forestry Research*, 3 : 77-84. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01064-y>
- Alaba P., Atti T., Komla E.A, Adjonou K., Segla K.N., Kokutse A.D. & Kokou K. (2021a). Effect of nursery substrate on the growth of *Pterocarpus erinaceus* Poir. Seedlings. *International Journal of Current Research in Biosciences and Plant Biology*, 8(9) : 17-27. doi: <https://doi.org/10.20546/ijcrbp.2021.809.003>

- Alaba P., Abotsi K.E., Adjonou K., Segla K.N., Kokutse A.D. & Kokou K. (2021b). Mycorrhizal Status of Natural Stands of *Pterocarpus erinaceus* Poir. (Fabaceae) in Sudanian and Guinean Zones of West Africa. *Annual Research & Review in Biology*, 36 (6) : 81-90.
- Anest A., Tristan C.D., Maurin O., Millan M., Edelin C. & Tomlinson K.W. (2021). Evolving the structure: climatic and developmental constraints on the evolution of plant architecture. A case study in *Euphorbia*. *New Phytologist*, 231 : 1278-1295. doi: 10.1111/nph.17296
- Anoma G. & Ake-Assi L. (1989). Flore de la Côte d'Ivoire : disparition de nombreuses espèces due à la destruction inconsidérée de l'espace naturel. Le cas de *Monanthon capense* (E.G. et A. Camus) Verdc. (Annonaceae), *Bulletin de la Société Botanique de France. Actualités Botaniques*, 136 (3-4) : 27-31. DOI: 10.1080/01811789.1989.10826950
- Anonyme. (2020). Le climat en Côte d'Ivoire. <https://fr.climate-data.org/afrique/cote-d-ivoire-134/>. Consulté le 28 mars 2020.
- Arbonnier M. (2004). Trees, shrubs and lianas of West African dry zones. *CIRAD, Margraf Publishers GmbH, MNHN, Paris, France*, 573 p.
- Arbonnier M. (2009). Arbres arbustes et lianes des zones sèches d'Afriques de l'Ouest. *Edition Quae, MNHN, ISBN 978-2-85653-626-1, Versailles, France*, 573p.
- Assogbadjo A.E., Kyndt T., Sinsin B., Gheysen G. & Van-Damme P. (2006). Patterns of genetic and morphometric diversity in baobab (*Adansonia digitata* L.) populations across different climatic zones of Benin (West Africa). *Annals of Botany*, 97 : 819-830.
- Avana-tientcheu M.L.A., Keouna S., Dongock N.D. & Mouga M.B. (2019). Structure des peuplements et potentiel de domestication de *Parkia biglobosa* dans la région de Tandjilé-Ouest (Tchad). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 13 (1) : 219-236.
- Barczy J.F., Rey H., Caraglio Y., De Reffye P., Barthélémy D., Dong Q. & Fourcaud T. (2008). AMAP-Sim: a structural whole-plant simulator based on botanical knowledge and designed to host external functional models. *Annals of Botany*, 101 : 1125-1138.

- Bathélemy D. (1988). Architecture et sexualité chez quelques plantes tropicales : le concept de floraison automatique. Thèse de doctorat, Université de Montpellier (Montpellier, France), 197 p.
- Barthélémy D., Edelin C. & Hallé F. (1989). Architectural concepts for tropical trees. *In: L.B. Holm-Nielsen and H. Balslev (Eds.). Tropical forests: Botanical dynamics, speciation and diversity, Academic Press, London : 89-100 p.*
- Barthélémy D., Caraglio Y. & Costes E. (1997). Architecture, gradients morphogénétiques et âge physiologique chez les végétaux. *In: Bouchon, J., de Reffye, P., Barthelemy, D. (Eds.), Modélisation et simulation de l'architecture des végétaux. INRA éditions, Paris, France : 89–136 p.*
- Barthélémy D. & Caraglio Y. (2007). Plant Architecture: A Dynamic, Multilevel and Comprehensive Approach to Plant Form, Structure and Ontogeny, *Annals of Botany*, 99 : 375-407. <https://doi.org/10.1093/aob/mcl260>
- Bosanac B. & Zanchi P. (2002). Onyx tree conifer user's manual, version 5.1. *Onyx Computing Inc*, Cambridge, (London, England), 34 p.
- Buck-Sorlin G.H. & Bell A.D. (2000). Models of crown architecture in *Quercus petraea* and *Q. Robur*: shoot lengths and bud numbers. *Forestry*, 73 : 1-19.
- Builders F.P., Akissaa H.S., Boma B. & Builders I.M. (2021). Efficacy of *Parkia biglobosa* Stem Bark in the Treatment of Burn Wounds. *Journal of Phytomedicine and Therapeutics*, 20 (1) : 529-541.
- Buis R. & Barthou H. (1983). Modèles de plantes innovants. *IX^e Congrès international de biologie mathématique*, 8-10 septembre 1983, Paris, France, pp 1-11.
- Burslem D.F.R.P. & Miller J. (2001). Seed size, germination and seedling relative growth rates in three tropical tree species. *Journal of Tropical Forest Science*, 13 (1) : 148-161.
- Calonnec A. (2013). Façonner l'architecture végétale pour contrôler les maladies des plantes. *Biofutur*, 343 : 37-42.

- Caraglio Y. & Barthélémy D. (1997). Revue critique des termes relatifs à la croissance et à la ramification des tiges des végétaux vasculaires. In: *Bouchon J., Reffye de P., Barthélémy D. (Eds), Modélisation et simulation de l'architecture des végétaux, Sciences Update, Editions INRA, Paris (France) : 11-88 p.*
- Carella A., Massenti R., Milazzo G., Caruso T. & Bianco R.L. (2022). Fruiting, Morphology and Architecture of Arbequina and Calatina Olive Branches. *Horticulturae*, 8 : 1-108 p. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8020109>
- Chavaneau C. (1989). Modélisation de la croissance et de l'architecture de l'Abricotier (*Prunus armeniaca* L.) D.A.A., Thèse, spécialité : Agronomie méditerranéenne, ENSA, Université de Montpellier, France, 77 p.
- Chesnes M., Herault B., Jalaly G., Louppe D. & Moynot G. (2020). Projet de plantation de bois d'œuvre multi -essences en Côte d'Ivoire « SCB en partenariat avec Inprobois », Rapport technique, 36 p.
- Choat B., Jansen S., Brodribb T.J., Cochard H., Delzon S., Bhaskar R., Bucci S.J., Field T.S., Gleason S.M., Hacke U.G., Jacobsen A.L., Lens F., Maherali H., Martinez-Vilalta J., Mayr S., Mencuccini M., Mitchell P.J., Nardini A., Pittermann J., Pratt R.B., Sperry J.S., Westoby M., Wright I.J. & Zanne A.E. (2012). Global Convergence in the Vulnerability of Forests to Drought. *Nature*, 491 : 752-755. <https://doi.org/10.1038/nature11688>
- Chupez T.J, Ndoye O., Tchatat M. & Chikamai B. (2009). Processing and Marketing of Non-wood Forest Products: Potential Impacts and Challenges in Africa. *Discovery & Innovations* : 60-65 p.
- Cissé A., Aka J.C.K., Kouamé D., Vroh B.T.A., Adou C.Y. & N'guessan K.E. (2016). Caractérisation des pratiques agroforestières à base de cacaoyers en zone de forêt dense semidécidue : Cas de la localité de Lakota (Centre-Ouest, Cote d'Ivoire). *European Scientific Journal*, 12 (21) : 50-69.
- CITES-Secrétariat. (2016). Notification of the Parties No. 2016/008, 8 p. [https://cites.org/sites/default/files/notif/E Notif 2016 008.pdf](https://cites.org/sites/default/files/notif/E%20Notif%202016%20008.pdf). Consulté le 28 mars 2022.

- Cop26. (2021). UN climate change conference uk 2021. Report, 5 p.
<https://www.who.int/publications-detail-redirection/cop26-special-report>. Consulté le 28 mars 2022.
- Couch C., Molmou D. & Magassouba S. (2019). Conservation Action Plan (CAP) : *Pterocarpus erinaceus* Poir. (Leguminosae). Technical Report, 4p. Doi: 10.13140/RG.2.2.30085.50401
- Dauzat J., Rapidel B. & Berger A. (2001). Simulation of leaf transpiration and sap flow in virtual plants : model description and application to a coffee plantation in Costa Rica. *Agricultural and Forest Meteorology*, 109 : 143-160. doi:10.1016/S0168-1923(01)00236-2
- De Jong T. & Da Silva D. (2010). Proceedings of the 6th international workshop on functional–structural plant models. University of California, Davis (USA). *International Symposium of FSPM*, 13 June 2010, California, USA, pp 1-7.
- De Reffye P., Dinouard P. & Barthélémy D. (1991a). Modélisation et simulation de l'architecture de l'Orme du Japon *Zelkova serrata* (Thunb.) Makino (Ulmaceae) : la notion d'axe de référence. *Naturalia Monspeliensia*. Série Botanique. *Comptes Rendus du 2^e Colloque international sur l'arbre, Hors-Série*, 10-15 Septembre 1990, Montpellier, France, pp 251-266.
- De Reffye P., Elguero E. & Costes E. (1991b). Growth units construction in trees : a stochastic approach. *Acta Biotheoretica*, 39 : 325-342.
- De Reffye P., Heuvelink E., Barthélémy D. & Cournède P.H. (2008). Plant growth models. In : *Jorgensen SE, Fath BD (eds) Encyclopedia of ecology vol 4*. Amsterdam (Netherlands) : 2824-2838.
- De Reffye P. (2009). Modélisation en biologie végétale. Production végétale et architecture des plantes. *Conférence de l'Académie d'Agriculture de France*, 28 janvier 2009, Paris, France, pp 1-8.
- De Reffye P., Jaeger M. & Cournède P.H. (2010). La modélisation des plantes. Article digiplante : le monde végétal, 13 p. <http://www.mas.ucp.fr/digiplante/fr/>, consulté le 12/03/2021.

- De Reffye P., Kang M., Hua J. & Auclair D. (2012). Stochastic modelling of tree annual shoot dynamics. *Annals of Forest Science*, 69 : 153-165.
- De Reffye P. & Jaeger M. (2013). Modèles mathématiques du développement et de la croissance de l'architecture des plantes : le cas du modèle GreenLab. In : Eds. Franck Varenne & Marc Silberstein (Tome 1, volume 2) ; *Modéliser & simuler (Éditions Matériologiques, Sciences & Philosophie) : épistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation*, 22, Paris (France) : 625-658.
- De Reffye P., Jaeger M., Barthélémy D. & Houllie F. (2018). Architecture des plantes et production végétale : Les apports de la modélisation mathématique. *Editions Cirad, Ifremer, Inra, Irstea, Quæ, Saint-Denis (France)*, 357 p.
- De Reffye P., Hu B., Kang M., Letort V. & Jaeger M. (2021). Two decades of research with the GreenLab model in agronomy. *Annals of Botany*, 127 : 281-295. <https://doi.org/10.1093/aob/mcaa172>
- Deb P. & Sundriyal R.C. (2017). Effect of seeds size on germination and seedling fitness on four tropical rainforest tree species. *Indian Journal of Forestry*, 40 (4) : 313-322.
- Deussen O. & Lintermann B. (2005). Digital design of nature : computer generated plants and organics. *Foundation Springer*, Edition Hardcover, Berlin (Germany), 11 p.
- Diao J., De Reffye P., Lei X., Guo H. & Letort V. (2012). Simulation of the topological development of young eucalyptus using a stochastic model and sampling measurement strategy. *Computers and Electronics in Agriculture*, 80 : 105-114. Doi:10.1016/j.compag.2011.10.019
- Dipelet U.G.B., Doumenge C., Loumeto J.L., Jacques F., Gonmadje C. & Doyle M. (2019). Des confusions entre espèces préjudiciables à la gestion durable des essences forestières : l'exemple des acajous d'Afrique (*Khaya*, Meliaceae). *Bois et forêts des tropiques*, 339 (1) : 17-32.
- Dotchamou O.F.T., Atindogbe G., Azihou A.F. & Fonton N.H. (2016). Caractérisation de la répartition spatiale des arbres de *Parkia biglobosa* (jacq.) R. Br. Au Bénin. *Science de la vie, de la terre et agronomie REV. CAMES*. 4 (1) : 59-67.

- Dougnon V., Hounsa E., Koudokpon H., Agbodjento E., Afaton A., Sintondji K., Klotoe J.R., Segbo J. & Lamine B.M. (2021). Assessment of the antibacterial effect of *Khaya senegalensis* on some Gram-negative bacteria. *Bulletin of the National Research Centre*, 45: 1-107. <https://doi.org/10.1186/s42269-021-005680>
- Dro B., Soro D., Koné M., Bakayoko A. & Kamanzi K. (2013). Evaluation de l'abondance de plantes médicinales utilisées en médecine traditionnelle dans le Nord de la Côte d'Ivoire. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 17 (3) : 2631-2646.
- Dukku H.U. (2010). *Parkia biglobosa* An important honeybee forage in the Savanna. *Plants for Bees*, 13 : 1-29.
- Dumenu W.K. & Bandoh W.N. (2016). Exploitation of african rosewood (*Pterocarpus erinaceus*) in ghana: a situation analysis. *Ghana Journal of Forestry*, 32 : 1-15.
- Dumenu W.K. (2019). Assessing the Impact of Felling/Export Ban and CITES Designation on Exploitation of African Rosewood (*Pterocarpus erinaceus*). *Biological Conservation*, 236 : 124-133. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.05.044>
- Duvall C.S. (2008). *Pterocarpus erinaceus* Poir. In : Louppe, D., Oteng-Amoako, A.A. & Brink, M. (Editors). *PROTA (Plant Resources of Tropical Africa)*, 22, Wageningen-Gelderland (Netherlands) : 17-40.
- Edelin C. (1977). Images de l'architecture des conifères. Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier (France), 255 p.
- Edelin C. (1984). L'architecture monopodiale : l'exemple de quelques arbres d'Asie tropicale. Thèse de Doctorat d'État, Université Montpellier II (France), 205 p.
- Ellis R.H. (1992). Seed and seedling vigor in relation to crop growth and yield. *Journal of Plant Growth Regulation – Springer*, 11 : 249-255.
- FAO. (2020). La situation des forêts du Monde. Rapport, 9 p. <https://www.fao.org/3/ca8642fr/online/ca8642fr.html>. Consulté le 20 Février 2022.
- FAO. (2022). La diminution des forêts mondiales souligne l'urgence de sauvegarder leur biodiversité. Rapport FAO Regional Office for Africa, 2p. <https://www.fao.org/africa/news/detail-news/en/c/1277121/>. Consulté le 20 Février 2022.

- Feng L., De Reffye P., Dreyfus P. & Auclair D. (2012). Connecting an architectural plant model to a forest stand dynamics model application to Austrian black pine stand visualization. *Annals of Forest Science*, 69 : 245-255. Doi:10.1007/s13595-011-0144-5
- Fourcaud T., Zang X., Stokes A., Lambers H. & Körner C. (2008). Plants growth modeling and applications : The increasing importance of plant architecture in growth models. *Annals of Botany*, 101 (8) : 1053 -1063.
- Fournier D. (1989). Modélisation de la croissance et de l'architecture du merisier (*Prunus avium* L.) D.A.A. Thèse de Doctorat, spécialité : Agronomie méditerranéenne, ENSA, Université de Montpellier II, Montpellier (France), 77 p.
- Fredrick C., Muthuri C., Ngamau K. & Sinclair F. (2017). Provenance and pretreatment effect On seed germination of six provenances of *Faidherbia albida* (Delile) A. Chev. *Agroforestry Systems*, 91 (6) : 1007-1017. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-9974-3>.
- Goba A.E., Koffi G., Raoul S.S., Leonie C.K. & Yeboa A.K. (2019). Structure démographique et régénération naturelle des peuplements naturelle de *Pterocarpus erinaceus* Poir. (Fabaceae) des savanes de Côte d'Ivoire. *Bois Et Forêts Des Tropiques*, 341 (3) : 5-14.
- Godin C. & Caraglio Y. (1998). A multiscale model of plant topological structures. *Journal of Theoretical Biology*, 191 : 1-46.
- Guillaumet J.L., Adjanohoun E., Avenard J.M., Eldin M., Girard G., Circoulin J., Toucheboeuf P. & Perraud A. (1971). Le milieu naturel de Côte d'Ivoire. Mémoire ORSTOM no50. ORSTOM, Paris (France), 156-264 p. <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:16372>.
- Hage S., Serena S., Marinangeli C., Octave J.N., Dewachter I., Quetin-Leclerc J. & Kienlen-Campard P. (2015). Characterization of *Pterocarpus erinaceus* kino extract and its gamma-secretase inhibitory properties. *Journal of Ethnopharmacology*, 163 : 192-202. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jep.2015.01.028>
- Hallé F. & Martin R. (1968). Etude de la croissance rythmique chez l'Hévéa (*Hevea brasiliensis* Mull. Arg.). *Adansonia, Bulletin du Muséum national d'histoire naturelle, Série 2*, 8 (4) : 475-503.
- Hallé F. & Oldeman R.A.A. (1970). Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux. Masson, Paris (France), 178 p.

- Hallé F., Oldeman R.A.A. & Tomlinson P.B. (1978). Tropical Trees and Forests : An Architectural Analysis. *Fondation Springer-Verlag*, Masson, Berlin (Germany), 463 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-81190-6>
- Hallé F. & Keller R. (2019). Mais d'où viennent les plantes ? Edition Actes sud, Paris (France) : 1-179.
- Hérault B., Anatole K.N., N'klo O., Assandé A., Fabrice B., Brahima C., Doua-Bi Y., Koffi Y., Koffi K.J.C., Konaté I., Tiéoulé F., Wourro F., Zo-Bi I.C. & Louppe D. (2020). The Long-Term Performance of 35 Tree Species of Sudanian West Africa in Pure and Mixed Plantings. *Forest Ecology and Management*, 468, 118171. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118171>
- Heuret P., Nicolini E., Edelin C. & Roggy J.C. (2003). Approche architecturale pour l'étude des arbres de forêt tropicale humide guyanaise. *Revue Forestière Française*, LV - numéro spécial 2003 : 158-178. http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/2042/5783/2/340_350.pdf.txt. Consulté le 13 Février 2022
- Houndonougbo J.S.H., Kassa B., Mensah S., Salako V.K., Glèlè-Kakai R. & Assogbadjo A.E. (2020) A global systematic review on conservation and domestication of *Parkia biglobosa* (Jacq.) R. Br. ex G. Don, an indigenous fruit tree species in Sub-Sahara African traditional parklands: current knowledge and future directions. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 67 : 1051-1066. <https://doi.org/10.1007/s10722-020-00892-w>
- Inventaire national du patrimoine naturel. (2021a). Classification hiérarchique de *Khaya senegalensis* (Desr.) A.Juss., 1830, 2p. https://inpn.mnhn.fr/espece/cd_nom/447326/tab/taxo. Consulté le 13 Février 2022
- Inventaire national du patrimoine naturel. (2021b). Classification hiérarchique de *Pterocarpus erinaceus* Poir., 1796, 2 p. https://inpn.mnhn.fr/espece/cd_nom/448093/tab/taxo. Consulté le 13 Février 2022
- Inventaire national du patrimoine naturel. (2021c). Classification hiérarchique de *Parkia biglobosa*(Jacq.) R. BR. ex G. Don, 1830, 2 p. https://inpn.mnhn.fr/espece/cd_nom/448093/tab/taxo. Consulté le 13 Février 2022

- Iralu V. & Upadhaya K. (2018). Seed dormancy, germination and seedling characteristics of *Elaeocarpus prunifolius* Wall. ex Müll. Berol : a threatened tree species of north-eastern India. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 48 : 1-16. <https://doi.org/10.1186/s40490-018-0121-y>.
- Issa I., Wala K., Dourma M., Atakpama W., Kanda M. & Akpagana K. (2017). Valeur ethno botanique de l'espèce *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss (meliaceae) auprès des populations riveraines de la chaîne de l'Atacora au Togo. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaire*, 6 : 64-72.
- Jaeger M., Sabatier S.A., De Reffye P., Alsater A.A. & Brancheriau L. (2020). Efficient Stochastic Functional Structural Symptodial Shrubs Modelling Base Don structural Hierarchy. Application to Guayule. *FSPM conference: Towards Computable Plants*, 11 November 2020, Leibniz, Germany, pp 1-2.
- Johnson B.N., Quashie A.M.L., Adjonou K., Segla K.N., Kokutse A.D. & Kokou K. (2020a) Characterization of germination and growth of *Pterocarpus erinaceus* Poir. from Togo. *International Journal of Science and Research*, 9 (10) : 1744-1754.
- Johnson B.N., Quashie M.L.A., Chaix G., Camus-Kulandaivelu L., Adjonou K., Segla K.N., Kokutse A.D., Ouinsavi C., Bationo B.A, Rabiou H., Kokou K. & Vignes H. (2020b). Isolation and characterization of microsatellite markers for the threatened African endemic tree species *Pterocarpus erinaceus* Poir. *Ecology and Evolution - Wiley Online Library*. 0 (0) : 1-9. <https://doi.org/10.1002/ece3.6944>
- Kang M.Z., Cournède P.H., De Reffye, P. & Hu B.G. (2008). Analytic study of a stochastic plant architectural model: application to the GreenLab model. *Mathematics and Computers in Simulation*, 78 : 57-75.
- Kang M.Z., Yang L., Zhang B.G. & De Reffye P. (2011). Correlation between dynamic tomato fruit-set and source-sink ratio: A common relationship for different plant densities and seasons. *Annals of Botany*, 107 (5) : 805-815.
- Kankia H.I. & Zainab S. A. (2014). Identification of terpenoids from *Khaya senegalensis*. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 5 (12) : 1577-1582.

- Kouassi K.C., Adjé B.I. & Traoré K. (2019). Floristic diversity of a Voluntary Natural Reserve (VNR) of Sucrivoire on the right bank of the Bandama river in Zuenoula, in the West Centre of Côte d'Ivoire. *International Journal of Agriculture, Environment and Bioresearch*, 4 (4) : 909-918. Doi: 10.22161/ijeab.444
- Kouonon L.C., Koffi K.G., Adjoumani K., Mobio A.D.S. & Goba K.A.E. (2020). Caractérisation phénotypique du néré (*Parkia biglobosa* (Jacq.) R. Br. ex G. Don, Fabaceae) dans trois types de savane de Côte d'Ivoire. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 14 (2): 555-569. Doi: <https://dx.doi.org/10.4314/ijbc>
- Kuniyal C.P., Purohit V., Butola J.S. & Sundriyal R.C. (2013). Seed size correlates seedlings emergence in *Terminalia bellerica*. S. *South African Journal of Botany - Elsevier*, 87 : 92-94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sajb.2013.03.016>
- Lauri P.E., Kelner J.J., Trottier J.C. & Costes E. (2010). Insights into Secondary Growth in Perennial Plants : Its Unequal Spatial and Temporal Dynamics in the Apple (*Malus domestica*) Is Driven by Architectural Position and Fruit Load. *Annals of Botany*, 105 : 607-616. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq006>
- Le Roux A., Lacoïnte A., Escobar-Gutierrez S. & Le Dizes. (2001). Carbon-based models of individual tree growth : A critical appraisal. *Annals of Forest Sciences*, 58 : 469-506.
- Leroy C. (2005). Rôle de l'architecture dans l'interception lumineuse des couronnes de *Tectona grandis* et *Acacia mangium*. Utilisation pour la simulation des bilans radiatifs dans les systèmes agroforestiers. Thèse de Doctorat. Ecologie, Environnement, Université Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, France, 321 p. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00012166>.
- Leroy M., Derroire G., Vendé J. & Leménager T. (2015). La gestion durable des forêts tropicales. De l'analyse critique du concept à l'évaluation environnementale des dispositifs de gestion. *Bois et forêts des tropiques*, 325 (3) : 86-87.
- Letort V., Cournède P.H., Mathieu A., De Reffye P. & Constant T. (2008). Parametric identification of functional-structural tree growth model and application to beech trees (*Fagus sylvatica* L.). *Functional Plant Biology*, 35 : 951-963.

- Letort V., Cournède P.H. & De Reffye P. (2009). Impact of topology on plant functioning: a theoretical analysis based on the GreenLab model equations. *In: B.G. Li, M. Jaeger, Y. Guo, (Eds.), Proceedings of the Third International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications. PMA 09, IEEE Computer Society, Beijing (China) : 341-348.*
- Letort V., Sabatier S., Akaffou S., Hamon S., Hamon P. & De Reffye P. (2012). Interspecific variability of biomass production of young *Coffea*: No influence of branch pruning. Experimental evidence and theoretical analysis. *In : IEEE 4th International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications. PMA, Shanghai (Chine) : 224-227.*
- Letort V., Sabatier S., Okoma M. P., Jaeger M. & De Reffye P. (2020). Internal trophic pressure, a regulator of plant development? Insights from a stochastic functional–structural plant growth model applied to *Coffea* trees. *Annals of Botany*, 126 (4) : 687-699.
- Lompo D., Vinceti B., Gaisberger H., Konrad H., Duminil J., Ouedraogo M., Sina S. & Geburek T. (2017). Genetic conservation in *Parkia biglobosa* (Fabaceae: Mimosoideae) - what do we know? *De Guyter*, 8 p. Doi:10.1515/sg-2017-0001
- Louppe D. (1990). Sylviculture intensive en zone de savanes. Rapport technique, 12 p.
<https://www.researchgate.net/publication/303371083>
- Louppe D., Ouattara N., N'guessan A.K., Zo-Bi I., Tiéoulé F., Ahoba A., Coulibaly B. & Hérault B. (2021a). Vingt-deux espèces d'arbres autochtones plantées en arboretum à Korhogo au nord de la Côte d'Ivoire : trois décennies de suivi. *Bois et Forêts des Tropiques*, 348 (2) : 79-105. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2021.348.a36399>
- Louppe D., Ouattara N., Wourro F., Ahoba A. & Hérault B. (2021b). Vène, *Pterocarpus erinaceus*. Rapport technique, 2 p. Doi: 10.13140/RG.2.2.34762.49605
- Louppe D., Ouattara N., Wourro F., Ahoba A. & Hérault B. (2021c). NÉRÉ, *Parkia biglobosa* (Jacq.) R.Br. ex G.Don. Technical Report, 2 p. Doi: 10.13140/RG.2.2.17985.28006
- Lu Y., Jiao L., He T., Zhang Y., Jiang X. & Yin Y. (2020). An optimized DNA extraction protocol for wood DNA barcoding of *Pterocarpus erinaceus*. *IAWA Journal*, 0 (0) : 1-16. DOI 10.1163/22941932-bja10006

- Maazou R., Rabiou H., Issiaka Y., Abdou L., Saidou I.S. & Mahamane A. (2017). Influence de l'occupation des terres sur la dynamique des communautés végétales en zone Sahélienne, cas de la commune rurale de Dantchandou (Niger). *International Journal of Biological and Chemical Science*, 11 : 79-92. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v11i1.7>
- Mabetty T. (2018). Le néré, un arbre du patrimoine de la Haute Guinée. *Belgeo*. <http://journals.openedition.org/belgeo/21569>. DOI : <https://doi.org/10.4000/belgeo.21569> . Consulté le 24 septembre 2022.
- Mandal S.M., Chakraborty D. & Gupta K. (2008). Seeds size variation: Influence on germination and subsequent seedlings performance in *Hyptis suaveolens* (Lamiaceae). *Research Journal of Seed Science*, 322 (1) : 26-33.
- Mao P., Guo L., Gao Y., Qi L. & Cao B. (2019). Effects of Seed Size and Sand Burial on Germination and Early Growth of Seedlings for Coastal *Pinus thunbergii* Parl. in the Northern Shandong Peninsula, China. *Forests*, 10 : 281. Doi:10.3390/f10030281.
- Maréchal C., Cawoy V., Coquyt C., Dauby G., Dessein S., Douglas-Hamilton I., Dupain J., Fischer E., Obang D.F., Groom Q., Henshel P., Jeffery K.J., Korte L., Lewis S.L., Lubunu S., Maisels F., Melletti M., Ngouffo R., Ntore S., Palla F., Scholte P., Sonke B., Stevart T., Stoffelen P., Broeck V.D., Walters G. & Williamson E.A. (2014). Conservation et Gestion de la biodiversité. In : Etat des Forêts 2013, De Wasseige C., Flynn J., Louppe D. & Hiol-Hiol F. Edition Mayaux Ph, WeyRich (Belgique) : 67-96.
- Mbowa C., Chhinb S., Samboua B. & Skolec D. (2013). Potential of Dendrochronology to Assess Annual Rates of Biomass Productivity in Savanna Trees of West Africa. *Dendrochronologia*, 31 : 41-51. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2012.06.001>
- Melson S.L., Harmon M.E., Fried J.S. & Domingo J.B. (2011). Estimates of live-tree carbon stores in the Pacific Northwest are sensitive to model selection. *Carbon Balance Manag*, 6 (2) : 11-19.
- Mialet I. (1990). Le cacaoyer, *Theobroma cacao* La modélisation de son architecture et de sa croissance : exemple de l'hybride UPA402* C410 (Doctoral dissertation), Université Montpellier II, Montpellier, France, 8p.

- Milberg P. & Lamont B.B. (1997). Seed/cotyledon size and nutrient content play a major role in early performance of species on nutrient-poor soils. *Wiley Online Library - New Phytologist*, 137 (4) : 665-672.
- Ministère des Eaux et Forêt. (2015). La forêt, une priorité du gouvernement. Rapport technique, 16p. https://www.gouv.ci/doc/PROPOS_LIMINAIRES_CICG_2%20verminef.pdf/. consulté le 13 Novembre 2020
- Muséum National d'Histoire Naturelle de l'unité Patrimoine Naturel & Office Française de la Biodiversité : MNHN & OFB [Ed]. (2021). Inventaire national du patrimoine naturel (INPN). Rapport, 9 p.<https://inpn.mnhn.fr>. Consulté le 17 novembre 2021
- Mtambalika K., Munthali C., Gondwe D. & Missanjo E. (2014). Effect of Seed Size of *Afzelia quanzensis* on Germination and Seedling Growth. *International Journal of Forestry Research*, 16 : 1-5. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/384565>.
- Mukhtar R.B., Inuwa A. & Umar M. (2021). Evaluation of growth response of *Parkia biglobosa* (jacq) under different levels of organic manures. *Journal of Tropical Agriculture, Food, Environment and Extension*, 20 (1) : 22-24. <https://dx.doi.org/10.4314/as.v20i1.4>
- Musara C., Aladejana E.B., Mudyiwa S.M. & Karavina C. (2020). *Parkia biglobosa* (Mimosaceae): Botany, Uses, Phytochemical Properties and Pharmacological Potential. *Journal of Pharmacy and Nutrition Sciences*, 10 : 101-115. <https://doi.org/10.29169/1927-5951.2020.10.03.4>
- N'golo B., Noufou D.O., Djézou K., Adama B. & Fezan H.T. (2018). Efets de cinq prétraitements sur la germination du vène (*Pterocarpus erinaceus* Poir., Fabaceae) dans la Réserve du Haut Bandama (Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal*, 30 (14) : 438-453.
- Nakar R.N. & Jadeja B.A. (2014). Seed pattern, germination and viability of some tree species seeds from Girnar Reserve Forest of Gujarat. *Indian Journal of Plant Physiology*, 19 : 57-64. <https://doi.org/10.1007/s40502-014-0078-7>
- Neya O. (2006). Conservation of tree seeds from tropical dry-lands. PhD thesis, Wageningen University, Wageningen, Netherlands, 160 p.

- Nicolini E. & Caraglio Y. (1994). L'influence de divers caractères architecturaux sur l'apparition de la fourche chez le *Fagus sylvatica*, en fonction de l'absence ou de la présence d'un couvert. *Canadian Journal of Botany*, 72 : 1723-1734. <https://doi.org/10.1139/b94-213>
- Nicolini E. (1998). Architecture et gradients morphogénétiques chez de jeunes hêtres (*Fagus sylvatica* L. Fagaceae) en milieu forestier. *Canadian Journal of Botany*, 76: 1232-1244.
- Nicolini E. (2000). Nouvelles observations sur la morphologie des unités de croissance du hêtre (*Fagus sylvatica* L.). Symétrie des pousses, reflet de la vigueur des arbres. *Canadian Journal of Botany*, 78 : 77-87. <https://doi.org/10.1139/cjb-78-1-77>
- Nicolini E., Beauchêne J., Leudet., De la Vallée B., Ruelle J., Mangenet T. & Heuret P. (2012). Dating branch growth units in a tropical tree using morphological and anatomical markers: the case of *Parkia velutina* Benoist (Mimosoïdeae). *Annals of Forest Science*, 69 : 543-555. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0172-1>
- Nikiema A. & Pasternak D. (2008). *Khaya senegalensis* (Desr.) A.Juss. In: Louppe D., Oteng-Amoako A.A. & Brink M. *PROTA (Plant Resources of Tropical Africa)*. Edition PROTA Network Office Europe, Wageningen, (Netherlands) : 1-8. <http://www.prota4u.org/search.asp>. Consulté le 8 juillet 2021.
- Nikles G.D., Reilly D.F. & Robertson R.M. (2004). Conservation and genetic improvement in the Northern Territory (Australia) of *Khaya senegalensis* (African mahogany): a valuable species endangered in part of its homelands. *Paper presented at the Workshop Prospects for high-value hardwood timber plantations in the 'dry' tropics of northern Australia*, 19-21 October 2004, Mareeba, Australia, pp 1-22.
- Nouffou O., Hay A.E, Ouédraogo J.C., Sawadogo W.R., Tibiri A., Lompo M., Nikiema J.B., Koudou J., Dijoux-F M.G. & Guissou I.P. (2010). Biological and phytochemical investigations of extracts from *Pterocarpus erinaceus* poir (fabaceae) root barks. *African Journal of Traditional, Complementary and Alternative Medicines*, 14 (1) : 187-195. Doi:10.21010/ajtcam.v14i1.21
- Ojewumi M.E., Omoleye A.J. & Ajayi A.A. (2018). Phenomenological Model of Percentage Protein in fermented Iru (*Parkia biglobosa*). Note peer-reviewed, 6 p. Doi:10.20944/preprints201808.0202.v1

- Oldeman R.A.A. (1974). L'architecture de la forêt guyanaise, Mémoire ORSTOM n°73, 204 p.
- Orwa C., Mutua A., Kindt R., Jamnadass R. & Anthony S. (2009). Agroforestry Database : a tree reference and selection guide version 4.0. World Agroforestry Centre report, Kenya, 2 p. <https://www.feedipedia.org/node/1650>
- Piba C., Koulibaly D., Goetze D., Porembski S. & Traoré D. (2011). Diversité et importance sociale des espèces médicinales conservées dans les agrosystèmes cacaoyers au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Annales de Botanique de l'Afrique de l'Ouest*, 7 : 80-96.
- PROTA. (2022). « uses.Plantnet-project.org ». Rapport technique, 15 p. [https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fuses.plantnet-project.org%2Fen%2FKhaya_senegalensis_\(PROTA\)&psig=A0vVaw3Oil_QJVf7pKOK66stdfkJ&ust=1664217400808000&source=images](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fuses.plantnet-project.org%2Fen%2FKhaya_senegalensis_(PROTA)&psig=A0vVaw3Oil_QJVf7pKOK66stdfkJ&ust=1664217400808000&source=images). Consulté le 23 Septembre 2022
- Rabiou H., Adjonou K., Issaharou-matchi I., Segla K.N., Bationo B.A., Kohutse A.D., Mahamane A. & Kokou K. (2019). Influence of anthropogenic and ecological factors on stand structure of *Pterocarpus erinaceus* Poir. in Sudanian and Sahelian zones of Burkina Faso and Niger. *Journal of Ecology and The Natural Environment*, 11 (7) : 98-107. Doi : 10.5897/JENE2019.0776
- Rabiou H., Issaharou-Matchi I., Adjonou K., Segla K.N., Bationo B.A., Kokou K. & Mahamane A. (2021). Plant formations of *Pterocarpus erinaceus* Poir. in Sudanian and Sahelian zones. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 6 (6) : 84-96. <https://dx.doi.org/10.22161/ijeab.66.10>
- Rasband W.S. (2014). ImageJ. U.S. National Institutes of Health, Bethesda. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5554542/>. Consulté le 7 Janvier 2020
- REDD+. (2017). « Stratégie nationale Redd+, Côte d'Ivoire ». Rapport final, 15 p. <https://chm.cbd.int/api/v2017/documents/>. Consulté le 23 Janvier 2022
- Reis L.H.V., Rocha L.F., Santos J.A., Souza C.R., Trazzi P.A., Barbosa L.O. & Carvalho D. (2021). Morphometric characterization of *Khaya senegalensis* in southern Minas Gerais state, Brazil. *Scientia Forestalis*, 49 : 1-131. <https://doi.org/10.18671/scifor.v49n131.16>

- Rosati A., Paoletti A., Caporali S. & Perri E. (2013). The Role of Tree Architecture in Super High Density Olive Orchards. *Scientia Horticulturae*, 161 : 24-29. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.06.044>
- Rosati A., Paoletti A., Hariri R.A. & Famiani F. (2017). Fruit production and branching density affect shoot and whole-tree wood to leaf biomass ratio in Olive. *Tree Physiology*, 38 : 1278-1285. Doi : 10. 1093/treephys/tpy009
- Sabatier S., Barthélémy D., Ducouso I. & Germain E. (1998). Modalités d'allongement et morphologie des pousses annuelles chez le noyer commun, *Juglans regia* L. 'Lara' (Juglandaceae). *Canadian Journal of Botany*, 76 : 1253-1264. <https://doi.org/10.1139/b98-055>
- Sabatier S. (1999). Variabilité morphologique et architecturale de deux espèces de Noyers: *Juglans regia* L., *Juglans nigra* L. et deux Noyers hybrides interspécifiques. Thèse de Doctorat, Biologie végétale, sciences et techniques du Languedoc, Université de Montpellier II, Montpellier, France, 143 p. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00106305>
- Sabatier S. & Barthélémy D. (1999). Growth dynamics and morphology of annual shoots according to their architectural position in young *Cedrus atlantica* (Endl.) Manetti ex Carriere (Pinaceae). *Annals of Botany*, 84 : 387-392. <https://doi.org/10.1006/anbo.1999.0939>
- Sabatier S., Caraglio Y. & Drénou C. (2014). L'architecture des arbres au service des forestiers. *Innovations Agronomiques*, 41 : 119-128.
- Sagang B.T., Ploton P., Sonké B., Poilvé H., Couteron P. & Barbier N. (2020). Airborne Lidar Sampling Pivotal for Accurate Regional AGB Predictions from Multispectral Images in Forest-Savanna Landscapes. *Remote Sensing*, 12 (1637) : 1-20. Doi:10.3390/rs12101637
- Segla K.N., Adjonou K., Rabiou H., Bationo B.A., Mahamane A., Guibal D., Kokou K., Chaix G., Kokutse A.D. & Langbour P. (2020). Relations between the ecological conditions and the properties of *Pterocarpus erinaceus* Poir. wood from the Guinean-Sudanian and Sahelian zones of West Africa. *Holzforschung*, 32 (2) : 1-11. <https://doi.org/10.1515/hf-2019-0250>

- Shayoub M.E.A., Kabbashi A.S., Sara M.A.A., Mahmoud N., Elhassan A.M., Ahmed M.E.A., Dawoud A.D.H., Jawad A.S.A.J. & Osman H.M. (2016). Anti-malarial Activity of *Khaya senegalensis*. *Indo American Journal of Pharmaceutical Research*, 6 (08) : 1-5.
- Silue P.A., Koffi K.A.D., Koffi A.B. & Kouassi K.E. (2021). Essais de germination et suivi des performances de croissance des plants de *Khaya senegalensis* (Desv.) A. Juss., en zone soudanienne (Côte d'Ivoire). *Journal of Animal & Plant Sciences*, 48 (2) : 8673-8685. <https://doi.org/10.35759/JANmPLSci.v48-2.4>
- Simão E. & Takaki M. (2008). Effect of light and temperature on seed germination in *Tibouchina mutabilis* (Vell.) Cogn. (Melastomataceae). *Biota Neotropica*, 8(2) : 1-14. <http://www.biotaneotropica.org.br/v8n2/pt/abstract?article+bn00908022008>.
- Sina S. (1999). Etude de la variabilité génétique de *Parkia biglobosa* (Jacq.) Benth.: approche par électrophorèse enzymatique. In: Ouédraogo, A.S. & Boffa, J.M. (Editors). Vers une approche régionale des ressources génétiques en Afrique Sub-Saharienne. *Actes du premier atelier régional de formation sur la conservation et l'utilisation durable des Ressources Génétiques Forestières en Afrique de l'Ouest, Afrique Centrale et Madagascar*, 16-27 Mars 1998, CNSF/IPGRI, Ouagadougou, Burkina Faso, pp 138-145.
- Sina S. & Traoré S.A. (2002). *Parkia biglobosa* (Jacq.) R.Br. ex G.Don. In: Oyen L.P.A. & Lemmens R.H.M.J. *PROTA (Plant Resources of Tropical Africa)*. Edition PROTA Network Office Europe, Wageningen, (Netherlands) : 1-22. <https://www.feedipedia.org/node/24357>. Consulté le 8 juillet 2021.
- Sodefor. (2013). Déboisement au dessus du 8e parallèle. Rapport, 48 p. http://labiblio.ensea.ed.ci/_opac_css/doc_num.php?explnum_id=103. consulté le 10 Mars 2022
- Soloviev P., Niang T.D., Gaye A. & Totte A. (2004). Variabilité des caractères physicochimiques des fruits de trois espèces ligneuses de cueillette, récoltés au Sénégal: *Adansonia digitata*, *Balanites aegyptiaca* et *Tamarindus indica*. *Fruits*, 59 : 109-119.
- Soualihou S., Zhiwei W., Weiwei S., De-Reffye P., Brian C., Gaëtan L. & Youhong S. (2021). Functional–Structural Plant Models Mission in Advancing Crop Science: Opportunities and Prospects. *Frontiers in plant science*, 747142 : 1-13. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2021.747142>

- Souza M.L. & Fagundes M. (2014). Seed Size as Key Factor in Germination and Seedling Development of *Copaifera langsdorffii* (Fabaceae). *American Journal of Plant Sciences*, 5 : 2566-2573, <https://dx.doi.org/10.4236/ajps.2014.517270>.
- Taugourdeau O., Delagrangé S., De Reffye P. & Messier C. (2013). Modelling sugar maple development along its whole ontogeny : modelling hypotheses and calibration methodology. *Finnish Society of Forest Science*, 3 : 1-14.
- Taugourdeau O., Chaubert-Pereira F., Sabatier S. & Guédon Y. (2012). Deciphering the developmental plasticity of walnut saplings in relation to climatic factors and light environment. *Journal of Experimental Botany*, 62 (15) : 5283-5296. <https://doi.org/10.1093/jxb/err115>
- Termote C., Odongo N.O., Dreyer B.S., Guissou B., Parkouda C. & Vinceti B. (2020). Nutrient composition of *Parkia biglobosa* pulp, raw and fermented seeds: a systematic review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 7 : 20-46. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1813072>
- Tiebre M.S., Ouattara D., Yao C.Y.A., Gnagbo A. & N'guessan K.E. (2016). Caractérisation de la flore et de la végétation et potentiel de conservation de la biodiversité végétale en zone d'activités anthropiques dans le Nord-est de la Côte d'Ivoire. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 17 (3) : 893-900.
- Toledo-Aceves T. (2017). Germination rate of endangered cloud forest trees in Mexico : potential for *ex situ* propagation. *Journal of Forestry Research*, 22 (1) : 61–64. <https://doi.org/10.1080/13416979.2016.1273083>.
- Tondjo K., Brancheriau L., Sabatier S., Kokutse A.D., Kokou K., Jaeger M., De Reffye P. & Fourcaud T. (2018). Stochastic modelling of tree architecture and biomass allocation : application to teak (*Tectona grandis* L. f.), a tree species with polycyclic growth and leaf neof ormation. *Annals of Botany*, 0 (0) : 1–14. <https://doi.org/10.1093/aob/mcy040>
- Tovar M.D.L., José J.A.G., Chamorro L.E.R. & Lozano J.G. (2022). Architecture of Cocoa Genotypes in Colombia as Affected by Bud Type, Grafting Technique, and Pruning. *Pelita Perkebunan*, 38(1) : 29-42. Doi: 10.22302/icc ri.jur.pelitaperkebunan.v38i1.49

- Ulrich G.B.D., Charle J.J., Loumeto F., Jacques C., Gonmadje D. & McKey D. (2019). Des confusions entre espèces préjudiciables à la gestion durable des essences forestières, l'exemple des acajous d'Afrique (*Khaya*, Meliaceae). *Bois et Forêts des Tropiques*, 339 : 17-32. <https://Doi.org/10.19182/bft2019.339.a31714>
- Vargas-Figueroa J.A. & Torres-González A.M. (2018). Germination and seed conservation of a pioneer species, *Tecoma stans* (Bignoniaceae), from tropical dry forest of Colombia. *Revista de Biología Tropical / International Journal of Tropical Biology and Conservation*, 66 (2) : 918-936. <http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v66i2.33423>
- Vos J., Marcelis L.F.M. & Evers J.B. (2007). Functional–structural plant modelling in crop production adding a dimension. In: Vos J., Marcelis L.F.M., De Visser P.H.B., Struik P.C. & Evers J.B. (eds) *Functional–structural plant modelling in crop production*. Edition Springer, Amsterdam (Netherlands) : 1-12.
- Wang F., Kang M.Z., Lu Q., Letort V., Han H., Guo Y., De Reffye P. & Li, B.G. (2011). A stochastic model of tree architecture and biomass partitioning : application to Mongolian Scots pines. *Annals of Botany*, 107 : 781-792.
- World Conservation Monitoring Centre : IUCN. (1988). *Khaya senegalensis*. The IUCN Red List of Threatened Species. Report, 5 p. <http://dx.doi.org/10.2305 /IUCN.UK. 1998 .RLTS .T32171A9684583>. Consulté le 4 Décembre 2021
- Zhan Z., Rey H., Li D., Guo Y., Cournède P.H. & De Reffye P. (2006). Study on the effects of defoliation on the growth of cotton plant using the functional structural model greenlab. In : *Plant growth modeling and applications. Proceedings PMA06: The Second International Symposium on plant growth modeling, simulation, visualization and applications*, 13-17 November 2006, Beijing, China, pp 194-201. <https://doi.org/10.1109/PMA.2006.53>
- Zhao X., De Reffye P., Xiong F.L. & Zhan Z.G. (2001). Dual-scale automaton model for virtual plant development. *Chinese Journal of Computers*, 24 (6) : 8-61.
- Zohoun L., Michodjehoun L., Houndeffo T., Kangbeto R., Gbenou J. & Sezan A. (2018). Chronophysiology of Rat Wistar under Extracts from *Khaya Senegalensis*. *International Journal of Science and Research*, 7 (1) : 2319-7064. Doi: 10.21275/ART20174031

ANNEXES

Annexes 1 : fiche d'évaluation de la germination et de la croissance des semis selon la taille des graines

FICHE D'ÉVALUATION DE GERMINATION

Date de récolte des semences :..... Localité :.....

Date de semis :..... Nom de l'espèce :.....

Classes de taille de graines (petites, moyennes ou grosses)	Nombre de graine (2 graines par pot) ou poquet = 60 graines		
	Date de germination		
.....	N°1 :.....	N°21 :.....	N°41 :.....
	N°2 :.....	N°22 :.....	N°42 :.....
	N°3 :.....	N°23 :.....	N°43 :.....
	N°4 :.....	N°24 :.....	N°44 :.....
	N°5 :.....	N°25 :.....	N°45 :.....
	N°6 :.....	N°26 :.....	N°46 :.....
	N°7 :.....	N°27 :.....	N°47 :.....
	N°8 :.....	N°28 :.....	N°48 :.....
	N°9 :.....	N°29 :.....	N°49 :.....
	N°10 :.....	N°30 :.....	N°50 :.....
	N°11 :.....	N°31 :.....	N°51 :.....
	N°12 :.....	N°32 :.....	N°52 :.....
	N°13 :.....	N°33 :.....	N°53 :.....
	N°14 :.....	N°34 :.....	N°54 :.....
	N°15 :.....	N°35 :.....	N°55 :.....
	N°16 :.....	N°36 :.....	N°56 :.....
	N°17 :.....	N°37 :.....	N°57 :.....
	N°18 :.....	N°38 :.....	N°58 :.....
	N°19 :.....	N°39 :.....	N°59 :.....
	N°20 :.....	N°40 :.....	N°60 :.....

Date à 50 % de graine germée (30 graines germées) :.....

.....

FICHE D'ÉVALUATION DE BIOMASSE DE PLANTULE

Espèce :

Localité :

Type de graine (Forme) :

Date de semi :

Date de mensuration à 1 mois :

Date de mensuration à 3 mois :

	AGE : 1 mois			AGE : 3 mois d'évolution														
	Haut	Diam au collet	Nbre de feuil	Haut	Diam au collet	Nbre feuil simpl	Nbre feuil comp	Nbre de branch	Long racin	Diam racin	Masse fraîch totale	Masse sèch totale	Masse fraîch feui_to	Masse sèch feui_to	Masse fraîch tige	Masse sèch tige	Masse fraîch racine	Masse sèch racine
N°1																		
N°2																		
N°3																		
N°4																		
N°5																		
N°6																		
N°7																		
N°8																		
N°9																		
N°10																		
N°11																		
N°12																		
N°13																		
N°14																		
N°15																		
N°16																		
N°17																		
N°18																		
N°19																		
N°20																		
N°21																		
N°22																		
N°23																		
N°24																		
N°25																		

Annexe 2 : images relatives aux choix des semenciers (a) et aux dispositif de semi en bloc à Daloa (b), Korhogo (c), à Montpellier (e) puis à l'arrosage en pepinière (d)



Annexe 3 : fiche d'analyse architecturale**1) Identification et localisation de l'espèce**

Espèce :

Localité (Co-GPS):.....

Type de milieu (environnement) et sol :..... Type biologique :.....

2) Caractères d'unité architecturale

Espèce :

Localité (Co-GPS):.....

Type de milieu (environnement) et sol :..... Type biologique :.....

	Tronc ou Tige principale	Branches	Rameaux	Brachyblastes ou Rameaux épicorniques
Phyllotaxie et symétrie				
Type de feuilles				
Type de croissance				
Direction préférentielle de croissance d'axe				
Ramification				
Taille des unités de croissances (UC)				
Caractéristique des pousses annuelles				
Sexualité				
Caducité des feuilles				
Conicité de l'axe				
Complexité de l'axe				
Réitération et type de réitération				

3) Caractères généraux d'architecture

1. Mode de croissance	2. Mode de ramification
3. Différenciation des axes	4. Position de la sexualité

Annexe 4 : tableau de l'influence des facteurs habitats, localités et habitat-localités sur la morphologie des unités de croissance chez les jeunes arbres de *Khaya senegalensis*

Habitats/Localités	Haut (m)	Diam (cm)	Long-UC1 (cm)	Diam-UC1 (cm)	Nbr-feuil-UC1	Long-UC2 (cm)	Diam-UC2 (cm)	Nbr-feuil-UC2
Pl-Soleil	1,71±0,1 5 b	5,39±2,2 7 b	16,78±14, 16 a	0,66±0,2 9 a	11,41±5, 64 a	20,17±10, 55 a	0,97±0,4 6 a	14,54±4, 17 a
So-Bois	3,54±1,2 4 a	3,54±1,5 6 a	16,46±10, 9 a	0,83±0,3 3 a	12,23±4, 10 a	17,92±8,5 9 a	1,22±0,4 2 a	15,23±3, 63 a
Pr > F	0,001	0,0034	0,9461	0,1126	0,6506	0,5207	0,1175	0,6262
Ferké	0,96±0,5 6 ab	3,08±1,7 b	17,1±5,30 a	0,56±0,1 9 a	12,33±5, 03 ab	15,9±3,63 a	0,92±0,3 8 ab	13±1 ab
Korhogo	5,64±4,8 7 a	9,63±6,0 4 a	21,83±18, 57 a	0,91±0,3 4 a	14±3,46 ab	21,94±15, 51 a	1,36±0,5 1 ab	15,75±3, 69 ab
Katiola	1,61±1,0 7 ab	3,73±1,2 7 b	24,7±6,51 a	0,88±0,2 7 a	18±3,61 a	27,9±9,24 a	1,57±0,2 1 a	19±3,46 a
Bouaké	4,68±1,5 8 ab	6,11±1,1 1 ab	11,32±3,9 2 a	0,86±0,3 6 a	8,2±2,39 b	19,92±2,8 7 a	1,12±0,4 6 ab	18±3,94 ab
Daloa	1,20±0,5 4 ab	2,37±1,4 4 b	17,38±15, 71 a	0,67±0,3 a	11,56±6, 27 ab	17,98±8,6 4 a	0,91±0,3 7 ab	13,56±3, 78 ab
Toumodi	0,52±0,1 7 b	1,53±0,6 b	10±5,43 a	0,48±0,1 6 a	8,86±4,0 5 b	15,48±7,3 3 a	0,72±0,2 4 b	8±2,58 b
Niakara	0,49±0,1 b	1,33±0,6 b	9±3,33 a	0,6±0,26 a	8,71±1,0 7 b	17,58±5,4 3 a	0,65±0,2 2 b	9±3,28 b
Pr > F	0,0022	0,0003	0,4063	0,0696	0,0387	0,5048	0,0177	0,0186
Pl-sol-Bouaké	3,6±1,41 a	7,16±0,6 7 a	12,7±6,64 a	0,58±0,3 4 a	8±4,24 a	22,3±1,84 b	0,88±0,6 4 ab	20,5±3,5 3 a
Pl-sol-Daloa	1,20±0,5 4 b	2,37±1,4 4 b	17,38±15, 74 a	0,67±0,2 9 a	11,55±6, 27 a	17,98±8,6 4 b	0,91±0,3 7 ab	13,56±3, 78 ab
Pl-sol-Katiola	1,02±0,4 b	2,99±0,1 8 b	1,35±4,17 a	0,96±0,3 3 a	17,5±4,9 5 a	22,65±2,3 3 b	1,45±0,0 7 ab	17 ab
Pl-sol-Korhogo	2,68±0,0 9 a	6,97±1,9 8 a	37,25±27, 51 a	0,98±0,3 0 a	17±2,82 a	41,8±15,9 8 a	1,71±0,7 2 a	19,5±3,5 3 ab
Pl-sol-Toumodi	0,51±0,1 7 b	1,53±0,5 9 b	10±5,42 a	0,48±0,1 6 a	8,86±4,0 5 a	15,48±7,3 4 b	0,72±0,2 3 b	12±2,58 b
Pr > F	0,0001	0,0001	0,1812	0,1012	0,1592	0,0160	0,0260	0,0125
So-bo-Bouaké	5,4±1,44 a	5,41±0,6 4 a	10,4±2,36 a	1,05±0,2 8 a	8,33±1,5 3 b	18,33±2,3 1 b	1,28±0,3 5 a	16,33±3, 78 b
So-bo-Ferké	0,96±0,5 6 a	3,08±1,7 a	17,01±5,3 a	0,56±0,1 9 a	12,33±5, 03 ab	15,90±3,6 2 b	0,92±0,3 8 a	13±1 b
So-bo-Katiola	2,8±0,32 a	5,19±0,3 5 a	31,4±10,5 6 a	0,71±2,3 a	19±12,04 a	38,4±5,61 a	1,8±0,53 a	23±9,87 a
So-bo-Korhogo	6,62±5,3 4 a	10,52±6, 82 a	16,68±14, 3 a	0,88±0,3 7 a	13±3,22 ab	15,32±8,6 8 b	1,25±0,4 5 a	14,5±3,0 2 b
Pr > F	0,3033	0,2491	0,4689	0,3477	0,01120	0,0458	0,3641	0,0347

Les valeurs portant les mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %.

Pl-Soleil/Pl-sol= environnement dégagé et exposé en plein soleil, *So-Bois/So-bo*= environnement encombré ou sous couvert forestier, *Haut (m)*= hauteur de l'arbre, *Diam (cm)*= diamètre à la base de l'arbre, *UC*= Unité de croissance, *Long-UC1 (cm)*= longueur de la première unité de croissance, *Diam-UC1 (cm)*= diamètre à la base de la première unité de croissance, *Nbr-feuil-UC1*= nombre de feuille ou phytomère porté par la première unité de croissance ; *Long-UC2 (cm)*, *Diam-UC2 (cm)*, *Nbr-feuil-UC2*= paramètres de la deuxième unité de croissance.

Annexe 5 : tableau de l'influence des facteurs habitats, localités et habitat-localités sur la morphologie des unités de croissance chez les jeunes arbres de *Pterocarpus erinaceus*

Habitats/Localités	Haut (m)	Diam (cm)	Long-UC1 (cm)	Diam-UC1 (cm)	Nbr-feuil-UC1	Long-UC2 (cm)	Diam-UC2 (cm)	Nbr-feuil-UC2
Pl-Soleil	1,83±0,5 b	3,21±0,4 9 a	17,73±8,4 9 a	0,51±0,2 a	11,45±4,2 9 a	21,64±9,3 8 a	0,82±0,3 4 a	16,33±6,6 4 a
So-Bois	2,32±0,5 9 a	3,93±0,1 3 a	24,51±14, 71 a	0,57±0,3 3 a	12,76±5,6 2 a	17,4±7,51 a	0,78±0,3 1 a	17,22±5,2 6 a
Pr > F	0,018	0,8225	0,0671	0,4673	0,6458	0,1237	0,7127	0,6426
Ferké	3,49±2,8 5 a	5,35±1,3 5 ab	28,74±16, 56 a	0,69±0,4 6 a	12±7,05 ab	17,32±7,0 6 a	0,88±0,4 4 a	15,12±4,9 9 bcd
Korhogo	4,28±2,5 9 a	7,16±1,5 8 a	22,05±13, 98 a	0,45±0,1 4 a	11,5±3,01 ab	21,32±10, 08 a	0,75±0,3 a	12,33±3,7 2 cd
Niakara	1,53±0,7 8 a	3,25±1,7 5 ab	19,23±11, 14 a	0,45±0,1 1 a	12,16±3,8 6 ab	22,03±12, 38 a	0,97±0,2 9 a	23±5,55 a
Katiola	2,79±1,6 9 a	5,31±3,0 8 ab	18,59±9,0 8 a	0,58±0,1 4 a	12,78±4,9 6 ab	19,55±5,6 5 a	0,74±0,1 4 a	18,77±4,4 9 abc
Bouaké	2,07±0,8 8 a	1,08±0,5 6 b	15,46±5,3 8 a	0,49±0,2 5 a	12,66±4,1 3 ab	21±13,78 a	0,79±0,4 7 a	21,16±2,3 1 ab
Daloa	0,53±0,1 7 a	0,82±0,5 2 b	15,04±6,8 6 a	0,33±0,0 7 a	6,4±1,34 b	19,08±7,3 3 a	0,55±0,0 6 a	8,6±2,97 d
Toumodi	3,35±1,7 6 a	4,26±1,8 ab	26,9±4,94 a	0,77±0,0 6 a	16,5±2,12 a	18,3±4,1 a	1,14±0,2 2 a	15±2,82 bcd
Pr > F	0,0634	0,0018	0,3365	0,1376	0,01834	0,9721	0,2737	0,0001
Psol-Bouaké	3,1±2,7 ab	1,09±0,9 9 b	12,25±8,2 7 a	0,59±0,3 8 a	11±5,6 a	36,9±5,51 a	1,08±0,9 3 a	21,5±3,53 a
Psol-Daloa	0,53±0,1 8 b	0,82±0,5 3 b	15,04±6,8 5 a	0,33±0,0 7 a	6,4±1,34 b	19,08±7,3 3 a	0,55±0,0 6 a	8,6±2,96 b
Psol-Ferké	1,32±0,7 7 ab	2,85±1,5 1 ab	18,5±0,14 a	0,54±0,0 2 a	9,5±3,53 a	15,6±8,2 a	0,77±0,1 3 a	16±4,24 ab
Psol-Katiola	3,43±1,3 ab	6,58±1,5 1 a	19,27±9,2 3 a	0,64±0,1 a	14,7±3,2 a	20,43±5,6 4 a	0,79±0,1 a	19,57±4,5 4 ab
Psol-Korhogo	2,7±0,55 ab	6,58±2,0 4 a	13,36±3,9 5 a	0,43±0,2 1 a	12,66±3,0 5 a	19,43±9,6 6 a	0,76±0,4 6 a	9,66±2,08 b
Psol-Niakara	1,34±0,6 6 ab	7,06±2,2 8 ab	20,85±12, 75 a	0,42±0,0 8 a	11,5±4,65 a	24,12±15, 42 a	1,03±0,3 5 a	22,75±5,5 6 a
Psol-Toumodi	4,6±1,33 a	5,54±3,3 2 a	30,4±14,1 1 a	0,82±0,3 a	15±9,31 a	21,2±14,2 3 a	1,31±0,8 1 a	17±5,43 b
Pr > F	0,0134	0,0001	0,5726	0,0616	0,0252	0,3292	0,2262	0,0007
Sbs-Bouaké	1,56±0,3 8 a	1,08±0,4 4 a	17,07±10, 66 a	0,44±0,0 4 a	13,5±3,87 a	13,05±7,3 3 a	0,65±0,0 6 a	21±2,16 a
Sbs-Ferké	4,22±2,9 6 a	6,18±4,9 9 a	32,15±18, 11 a	0,75±0,5 3 a	12,83±7,9 8 a	17,9±7,4 a	0,92±0,5 2 a	14,83±5,5 6 a
Sbs-Katiola	0,57±0,2 2 a	0,86±0,1 3 a	16,2±11,5 9 a	0,4±0,01 a	6±4,24 a	16,5±6,35 a	0,55±0,0 6 a	16±4,24 a
Sbs-Korhogo	5,87±3 a	7,26±0,9 9 a	30,73±15, 71 a	0,47±0,0 6 a	10,33±3,0 5 a	23,2±12,2 5 a	0,74±0,1 2 a	15±3 a
Sbs-Niakara	1,9±0,13 a	4,14±2,7 a	16,10,05 a	0,5±0,18 a	13,5±2,12 a	17,85±0,2 1 a	0,84±0,0 9 a	23,5±7,77 a
Sbs-Toumodi	2,1±1,4 a	2,99±0,4 7 a	23,4±8,11 a	0,73±0,0 7 a	18±4,8 a	15,4±6,11 a	0,97±0,2 1 a	13±7,01 a
Pr > F	0,1565	0,1454	0,5345	0,7042	0,5760	0,7222	0,7265	0,1753

Les valeurs portant les mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %.

Annexe 6 : tableau de l'influence des facteurs habitats, localités et habitat-localités sur la morphologie des modules de croissance chez les jeunes arbres de *Parkia biglobosa*

Habitats/Localités	Haut (m)	Diam (cm)	Long-MOD1 (cm)	Diam-MOD1 (cm)	Nbr-feuil-MOD1	Long-MOD2 (cm)	Diam-MOD2 (cm)	Nbr-feuil-MOD2
Psol	1,95±0,11 b	4,35±0,24 b	18,53±7,9 1 a	0,76±0,43 a	10,47±3,95 a	16,59±4,5 9 a	1,13±0,6 3 a	12,76±3,85 a
Sbs	2,56±0,05 a	7,06±1,22 a	14,8±7,06 a	0,88±0,13 a	12,33±4,5 a	19,52±7,9 7 a	1,55±0,5 5 a	15,17±4,99 a
Pr > F	0,0064	0,0036	0,5069	0,5522	0,3340	0,4953	0,1523	0,2181
Bouaké	3,2±7,8 9 ab	17,91±8,4 3 b	29,65±14,56 a	1,39±0,34 a	15,28±1,79 a	23,61±9,4 a	2,04±0,3 8 a	17,43±3,45 a
Daloa	0,77±0,11 b	1,41±0,51 c	13,74±8,2 7 a	0,43±0,07 b	7±2,06 b	15,98±7,8 4 a	0,6±0,09 c	9,78±2,1 6 a
Katiola	3,72±5,68 ab	11,09±6,6 4 bc	12,95±8,4 7 a	0,79±0,25 b	11,5±2,7 3 ab	13,95±3,4 7 a	1,37±0,2 8 b	14,5±3,0 8 a
Korhogo	0,95±3,32 b	11,06±7,8 1 bc	9,8±2,12 a	0,53±0,03 b	13±5,66 ab	18,5±5,6 a	1,06±0,4 7 bc	13,5±3,5 3 a
Niakara	5,6±1,4 1 a	17,98±12,4 a	15,7±3,8 a	0,73±0,1 b	12±4,4 ab	6,7±2,3 a	0,81±0,2 1 bc	14±3,4 a
Toumodi	0,79±1,28 b	6,14±3,08 bc	16,85±7,7 a	0,54±0,17 b	8,5±3,53 ab	14,5±6,5 a	1,14±0,3 7 bc	10,5±4,9 4 a
Ferké	1,19±1,3 b	5,74±1,21 bc	11,45±2,7 a	0,64±0,21 b	9,6±2,33 ab	16,1±7,5 a	0,84±0,6 bc	15,4±6,6 4 a
Pr > F	0,0045	0,0001	0,0533	0,0001	0,0001	0,3127	0,0001	0,0621
Psol-Bouaké	3,05±5,79 ab	10,71±11,36 ab	36,57±16,28 a	1,5±0,1 8 a	14,75±1,7 7 ab	22,85±6,1 9 a	2,12±0,3 9 a	16,25±3,5 a
Psol-Daloa	0,67±0,11 b	1,41±0,51 b	13,74±8,2 7 b	0,43±0,07 b	7±2,06 b	15,98±7,8 4 a	0,6±0,09 b	9,77±0,1 6 ab
Psol-Katiola	3,84±4,82 ab	9,57±6,15 ab	14,58±8,3 4 b	0,84±0,26 b	11,6±3,0 5 ab	14,12±7,5 8 a	1,36±0,3 1 b	15,6±1,6 7 a
Psol-Korhogo	3,3±2,3 ab	11,59±7,4 1 ab	8,3±2,31 b	0,53±0,21 b	17±4,3 a	26±6,63 a	1,4±0,61 b	16±3,33 a
Psol-Niakara	5,5±6,3 1 a	17,98±11,4 a	15,7±1,7 b	0,73±0,04 b	12±3,4 ab	6,7±1,73 a	0,81±0,1 1 b	14±2,36 a
Psol-Toumodi	1,48±0,13 b	2,96±1,31 b	22,3±6,3 ab	0,66±0,13 b	11±3,4 ab	9,9±0,83 a	0,88±0,2 3 b	7±1,7 b
Pr > F	0,0133	0,0001	0,0378	0,0001	0,0005	0,3566	0,0001	0,0009
Sbs-Bouaké	4,4±2,2 7 a	15,5±2,1 a	20,43±3,9 2 a	1,26±0,51 a	16±2 a	24,63±13,31 a	1,93±0,4 1 a	19±3,46 a
Sbs-Katiola	3,9±7,3 a	16,69±7,3 3 a	4,8±1,33 b	0,6±0,1 3 a	11±3,4 a	13,1±3,4 b	1,4±0,31 a	9±2,3 b
Sbs-Korhogo	4,6±1,7 a	5,54±1,83 b	11,3±3,41 ab	0,53±0,11 a	9±2,51 a	11±3,31 b	0,73±0,2 3 a	11±3,61 b
Sbs-Toumodi	4,3±0,7 7 a	7,32±3,1 b	11,4±2,6 ab	0,41±0,07 a	6±1,81 a	19,1±3,36 a	1,4±0,2 a	14±3,4 ab
Pr > F	0,0697	0,0086	0,0091	0,5020	0,1161	0,0014	0,3248	0,004

Les valeurs portant les mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %.

MOD=Module ou Unité de croissance, **Long-MOD1 (cm)**= longueur du premier module ou unité de croissance en centimètre, **Diam-MOD1 (cm)**= diamètre à la base du premier module ou unité de croissance en centimètre, **Nbr-feuil-MOD1**= nombre de feuille ou phytomère porté par le premier module ou unité de croissance, **Long-MOD2 (cm)**, **Diam-MOD2 (cm)**, **Nbr-feuil-MOD2**= Paramètres de la deuxième unité de croissance ou Modules.

Annexe 7 : tableau de l'influence de l'habitat et de la localité sur la morphologie des unités de croissance chez les arbres adultes de *Khaya senegalensis*

Habitats/Localités	Haut (m)	Diam (cm)	Long-UC1 (cm)	Diam-UC1 (cm)	Nbr-feuil-UC1	Long-UC2 (cm)	Diam-UC2 (cm)	Nbr-feuil-UC2
Pl-Soleil	14,09±8,05 a	34,97±11,43 a	8,08±1,89 a	0,76±0,24 a	7,5±2,39 a	15,13±6,46 a	1,14±0,32 a	18,37±2,56 a
So-Bois	11,6±6,33 b	29,08±12,12 b	18,1±13,48 a	0,72±0,10 a	13,75±7,89 a	19,3±10,85 a	0,94±0,25 a	16±3,46 a
<i>Pr > F</i>	0,0073	0,0422	0,0554	0,7543	0,0577	0,4174	0,3097	0,2051
Ferké	14,83±6,86 ab	49,62±14,28 a	13,37±13,02 a	0,79±0,15 a	10,66±5,68 a	11,8±3,96 b	1,25±0,39 a	17,66±2,52 a
Korhogo	8,45±5,31 b	17,96±5,06 b	7,3±3,02 a	0,78±0,56 a	9±4,21 a	17,3±6,51 ab	0,93±0,24 a	18±8,12 a
Niakara	18,5±8,66 a	48,82±13,91 a	7,67±1,86 a	0,62±0,14 a	5,5±1 a	13,9±2,43 ab	0,93±0,12 a	15,25±1,71 a
Katiola	13,6±9,21 ab	47,58±15,21 a	8,7±4,31 a	0,77±0,11 a	12±4,03 a	7±2,31 b	1,3±0,51 a	20±6,05 a
Bouaké	7,9±3,02 b	20,01±4,86 b	16,73±12,48 a	0,85±0,34 a	13,33±8,5 a	27,66±6,51 a	1,08±0,46 a	19,66±4,16 a
<i>Pr > F</i>	0,0079	0,0182	0,7590	0,7275	0,4770	0,0121	0,6899	0,3648
Pl-sol-Bouaké	9,86±8,20 b	15,13±6,51 b	11,4±6,64 a	1,24±0,34 a	7±2,3 a	28±4,32 a	1,68±0,31 a	23±8,65 a
Pl-sol-Ferké	17,85±6,29 a	27,49±10,09 ab	5,85±0,64 a	0,76±0,19 a	7,5±2,12 a	12,2±5,51 a	1,21±0,54 a	19±1,41 a
Pl-sol-Katiola	16±8,96 a	46,58±9,15 a	8,70±2,31 a	0,77±0,12 a	12±5,12 a	7±2,33 a	1,3±0,07 a	20±7,52 a
Pl-sol-Korhogo	8,8±7,82 b	17,96±9,25 b	7,3±1,05 a	0,78±0,30 a	9±4,21 a	17,3±15,98 a	0,93±0,72 a	18±3,53 a
Pl-sol-Niakara	17,69±3,42 a	44,72±16,39 a	8,5±1,06 a	0,59±0,16 a	5,66±1,15 a	14,8±2 a	0,96±0,12 a	16±1 a
<i>Pr > F</i>	0,0485	0,01952	0,0805	0,2299	0,1692	0,1097	0,5505	0,0610
So-bo-Bouaké	15,4±4,24 a	42,45±3,38 a	19,4±16,4 a	0,65±0,03 a	16,5±9,19 a	27,5±9,19 a	0,82±0,08 a	18±4,24 a
So-bo-Ferké	16,8±7,82 a	45,92±13,2 a	28,4 a	0,87±0,11 a	17±5,03 a	11±5,12 a	1,32±0,38 a	15±1,21 a
So-bo-Niakara	16±6,24 a	43,15 a	5,2 a	0,71±0,23 a	5±1,24 a	11,2±4,23 a	0,82±0,03 a	13±3,14 a
<i>Pr > F</i>	0,1267	0,0882	0,7027	0,1552	0,6727	0,4889	0,1923	0,7071

Les valeurs portant les mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %.

Annexe 8 : tableau de l'influence de l'habitat et de la localité sur la morphologie des unités de croissance chez les arbres adultes de *Pterocarpus erinaceus*

Habitats/Localités	Haut (m)	Diam (cm)	Long-UC1 (cm)	Diam-UC1 (cm)	Nbr-feuil-UC1	Long-UC2 (cm)	Diam-UC2 (cm)	Nbr-feuil-UC2
Psol	12,18±2,3 a	27,37±4,9 3 a	15,68±2,7 3 a	0,48±0,1 7 a	11,16±6,4 3 a	26,82±13, 27 a	0,72±0,1 6 a	15,5±6,94 a
Sbs	11,94±3,1 a	24,6±6,28 a	19,56±9,3 7 a	0,53±0,1 3 a	11,14±3,5 3 a	27,96±10, 29 a	0,79±0,0 7 a	21,28±8,7 6 a
Pr > F	0,4542	0,2197	0,5407	0,6110	0,9934	0,8645	0,2847	0,1287
Bouaké	11,4±0,1 8 a	16,27±0, 91 b	16,81±10, 37 a	0,45±0, 16 ab	12,17±3, 97 a	19,1±11,0 1 a	0,65±0, 15 ab	21,5±2,8 8 ab
Ferké	12,85±3, 47 a	21,39±6, 2 ab	28,59±5,1 7 a	0,72±0, 43 a	12,22±6, 63 a	16,62±6, 93 a	0,94±0, 45 ab	14,88±4, 73 c
Katiola	10,79±1,6 9 a	17,31±3,0 7 b	18,59±9,0 8 a	0,58±0,1 3 ab	12,78±4,9 6 a	19,55±5,6 5 a	0,74±0,1 4 ab	18,79±4,4 9 ab
Korhogo	12,37±7,1 2 a	22,99±6,7 6 ab	20,07±11, 81 a	0,49±0,1 5 ab	10,7±2,58 a	22,47±11, 58 a	0,78±0,2 3 ab	15,7±6,83 c
Niakara	11,15±4,9 a	21,26±5,1 6 ab	22,67±3,6 6 a	0,5±0,16 ab	13,2±4,96 a	29,12±17, 94 a	0,96±0,2 7 a	25,3±7,66 a
Toumodi	11,53±5,4 2 a	34,52±12, 49 a	15,43±7,8 6 a	0,58±0,2 ab	11,33±4,3 3 a	25,56±6,2 9 a	0,79±0,2 5 ab	14,89±3,5 5 bc
Pr > F	0,0997	0,0103	0,1894	0,0494	0,1994	0,2014	0,0481	0,0001
Psol-Korhogo	14,1±4,71 a	25,32±0,4 3 a	7,8±2,43 a	0,43±0,0 7 a	8±3,51 a	9,7±4,31 a	0,78±0,2 2 a	11±5,1 a
Psol-Niakara	12,6±7,4 a	21,68±11, 3 a	39,6±7,43 a	0,62±0,1 1 a	22±4,31 a	49,8±13,3 a	0,86±0,3 3 a	27±11 a
Psol-Toumodi	13,1±2,25 a	29,91±10, 06 a	11,67±6,1 1 a	0,46±0,2 1 a	9,25±4,64 a	25,35±4,1 a	0,67±0,1 8 a	13,75±5,0 5 a
Pr > F	0,3370	0,4771	0,0514	0,7861	0,1752	0,0137	0,6521	0,1792
Sbs-Korhogo	12,76±3,7 2 a	20,54±3,8 a	20,2±7,27 a	0,61±0,1 6 a	10±1 a	29,03±4,1 3 a	0,84±0,0 8 a	24±5,19 a
Sbs-Niakara	12,01±2,9 8 a	22,12±2,7 5 a	26,65±13, 5 a	0,43±0,0 1 a	12,5±3,78 a	22,5±9,19 a	0,78±0,0 6 a	23±7,07 a
Sbs-Toumodi	11±2,12 a	27,38±1,3 5 a	11,5±2,68 a	0,5±0,13 a	11,5±2,12 a	31,8±7,63 a	0,74±0,0 9 a	15,5±0,7 a
Pr > F	0,1708	0,0937	0,3141	0,4158	0,8011	0,7297	0,4436	0,2746

Les valeurs portant les mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %.

Annexe 9 : tableau de l'influence de l'habitat et de la localité sur la morphologie des modules de croissance chez les arbres adultes de *Parkia biglobosa*

Habitats/Localités	Haut (m)	Diam (cm)	Long-MOD1 (cm)	Diam-MOD1 (cm)	Nbr-feuil-MOD1	Long-MOD2 (cm)	Diam-MOD2 (cm)	Nbr-feuil-MOD2
Psol	9,68±1,1 4 a	38,15±3,02 a	15,63±5,1 5 a	0,76±0, 31 a	11,47±5, 97 a	16,15±12, 81 a	1,13±0, 58 a	14,14±6, 74 a
Sbs	12,02±1, 01 a	36,27±1,53 a	14,25±6,5 5 a	0,75±0, 11 a	10,89±4, 83 a	16,93±7,9 8 a	1,23±0, 38 a	16,55±5, 63 a
Pr > F	0,9971	0,4114	0,7956	0,9479	0,7968	0,8675	0,6768	0,3558
Bouaké	9,66±3,4 5 b	44,94±7,5 6 a	14,6±3,02 a	1,01±0, 25 a	11±2 a	21,36±12, 99 a	1,8±0,2 6 a	19±4,58 a
Ferké	9,23±5,4 7 b	39,39±5,4 7 a	26,94±12, 47 a	1,06±0, 53 a	15,57±7, 41 a	15,62±6,6 8 a	1,49±0, 77 a	13,57±7, 02 a
Katiola	13,1±7,3 3 a	28,57±8,6 b	7,8±0,74 a	0,71±0, 1 a	8±2,41 a	18,3±7,4 a	1,7±0,7 3 a	19±5,4 a
Korhogo	10,77±6, 5 b	33,54±15 b	10,95±2,1 2 a	0,59±0, 12 a	10,87±2, 07 a	12,38±3,5 6 a	0,81±0, 15 a	10,63±2, 65 a
Niakara	9,2±8,29 b	35,09±5,78 b	11,16±3,4 7 a	0,69±0, 14 a	8,4±2,08 a	15,14±3,4 9 a	0,89±0, 08 a	15,6±1,8 1 a
Toumodi	8,03±3,7 3 b	21,28±5,95 c	12,15±4,4 8 a	0,57±0, 19 a	10±2,96 a	20,83±3,1 2 a	1,07±0, 24 a	18,66±5, 31 a
Pr > F	0,0001	0,0001	0,1695	0,0596	0,2962	0,7971	0,0582	0,1745
Psol-Bouaké	8,7±1,83 b	45,92±11, 43 a	17±1,83 a	1,3±0,4 1 a	11±2,41 a	32,3±7,31 a	2,1±0,1 3 a	23±5,4 a
Psol-Ferké	12,3±5,5 6 a	41,01±5,8 9 ab	27,03±10, 05 a	1,11±0, 22 a	15,16±3, 28 a	15,4±7,9 a	1,61±0, 31 ab	12,83±3, 01 a
Psol-Korhogo	8,68±7,4 2 b	38,9±15,64 b	9,8±4,34 a	0,56±0, 12 b	10,33±2, 23 a	13,98±4,6 5 a	0,79±0, 07 b	11,33±3, 55 a
Psol-Niakara	12,25±2, 65 a	45,54±3,28 a	11,02±4,4 8 a	0,64±0, 04 b	8,75±2,6 5 a	14,32±8,7 6 a	0,81±0, 11 b	15,75±2, 06 a
Psol-Toumodi	7,62±1,6 6 b	21,1±0,85 c	11,55±2,7 1 a	0,52±0, 11 b	10,5±1,6 5 a	18,32±4,1 3 a	1,02±0, 11 b	16,5±2,5 3 a
Pr > F	0,0066	0,0006	0,3060	0,0331	0,5219	0,7787	0,0167	0,4820
Sbs-Bouaké	9,65±0,4 9 a	44,45±10,6 2 a	13,4±3,11 b	0,87±0, 05 a	11±2,82 a	15,9±8,9 a	1,65±0, 05 a	17±3 a
Sbs-Ferké	10,6±1,4 7 a	43,68±11,4 a	26,4±1,37 a	0,73±0, 11 a	18±1,73 a	17±2,43 a	0,78±0, 14 a	18±4,1 a
Sbs-Katiola	9,1±6,4 a	42,57±7,4 a	7,8±1,28 c	0,71±0, 04 a	8±2,4 a	18,3±7,1 a	1,7±0,1 3 a	19±2,7 a
Sbs-Korhogo	9,05±2,0 5 a	38,44±12,0 1 a	14,42±7,9 7 b	0,69±0, 07 a	12,5±6,5 a	7,6±0,2 a	0,86±0, 03 a	8,5±1,5 a
Sbs-Niakara	10±3,4 a	43,31±13,1 a	11,7±1,43 b	0,91±0, 14 a	7±2,4 a	18,4±1,48 a	1,2±0,1 3 a	15±6,1 a
Sbs-Toumodi	12,85±4, 15 a	45,64±7,48 a	13,35±1,9 5 b	0,66±0, 03 a	9±2,82 a	25,85±3,4 6 a	1,18±0, 35 a	23±2,82 a
Pr > F	0,0702	0,3151	0,0039	0,1959	0,7584	0,4713	0,1132	0,1262

Les valeurs portant les mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %.

Annexe 10 : tableau de l'influence de l'habitat et de la localité sur la morphologie des unités de croissance chez les vieux arbres de *Khaya senegalensis*

Habitats/Localités	Haut (m)	Diam (cm)	Long-UC1 (cm)	Diam-UC1 (cm)	Nbr-feuil-UC1	Long-UC2 (cm)	Diam-UC2 (cm)	Nbr-feuil-UC2
PI-Soleil	31,46±10,99 a	100,02±65,45 a	8,78±6,67 a	0,81±0,16 a	7,81±2,82 a	15,41±4,49 a	1,28±0,27 a	16,54±3,41 a
So-Bois	28,76±13,9 a	80,44±32,9 a	8,33±3,1 a	0,88±0,08 a	9±2,64 a	17,5±4,6 a	1,19±0,21 a	18±6,54 a
<i>Pr > F</i>	0,8146	0,2752	0,9154	0,4639	0,5282	0,4928	0,5857	0,4877
Ferké	35,62±16,22 a	204,22±48,78 a	12,37±10,69 a	0,71±0,16 a	9,5±3,6 a	18,5±4,9 a	1,3±0,3 a	17±3,27 a
Korhogo	32,7±3,24 a	85,54±5,64 b	5,8±1,86 a	0,97±0,14 a	6±1,03 a	18,7±2,4 a	1,4±0,1 a	18±1,71 a
Niakara	30,96±10,22 a	89,3±41,37 b	8,18±2,36 a	0,87±0,15 a	8,33±2,06 a	14,5±4,5 a	1,2±0,2 a	15,5±2,8 a
Katiola	31±3,6 a	122,6±8,24 ab	5,7±0,98 a	0,83±0,07 a	6,33±2,52 a	14,13±3,54 a	1,3±0,1 a	19±3,46 a
Bouaké	32,12±4,2 a	133,6±10,2 a	7,7±0,48 a	0,94±0,16 a	7,44±4,62 a	16,14±2,44 a	1,4±0,2 a	17,2±6,4 a
<i>Pr > F</i>	0,5959	0,0074	0,5150	0,3287	0,4427	0,4587	0,8844	0,4682

Les valeurs portant les mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %.

Annexe 11 : tableau de l'influence de l'habitat et de la localité sur la morphologie des unités de croissance chez les vieux arbres de *Pterocarpus erinaceus*

Habitats/Localités	Haut (m)	Diam (cm)	Long-UC1 (cm)	Diam-UC1 (cm)	Nbr-feuil-UC1	Long-UC2 (cm)	Diam-UC2 (cm)	Nbr-feuil-UC2
Psol	17,78±1,8 a	53,82±12,1 a	15,4±7,3 b	0,34±0,1 b	9±3,51 b	28,4±5,1 1 b	0,62±0,0 4 b	18±4,44 b
Sbs	19,3±3,2 a	50,51±10,7 a	22,9±6,36 a	0,89±0,0 3 a	13±1,41 a	37,6±26,6 a	1,4±0,2 a	27,5±14,5 a
Pr > F	0,3452	0,0973	0,0002	0,0006	0,021	0,0045	0,0001	0,0098
Ferké	18,7±6,3 a	59,71±10,4 ab	27,4±11,3 a	0,92±0,0 4 ab	14±6,4 ab	11±5,4 c	1,4±0,7 ab	13±5,4 c
Niakara	19,7±11,4 a	53,18±23,4 b	18,4±7,4 b	0,87±0,0 1 ab	12±3,31 ab	64,2±11,4 a	1,4±0,07 ab	42±7,6 a
Toumodi	18,7±7,3 3 a	54,74±6,6 b	15,4±4,33 b	0,34±0,0 6 b	9±5,3 b	28,4±7,6 ab	0,62±0,0 4 b	18±1,8 bc
Katiola	16,79±1,69 a	55,31±3,0 7 b	19,56±8,8 9 b	0,91±0,1 8 ab	16,56±6,32 ab	24±5,83 b	1,47±0,3 3 ab	23,87±4,1 2 b
Korhogo	19,37±7,12 a	67,99±6,7 6 a	20,49±9,5 1 b	1,23±0,4 5 a	15,1±3,7 3 ab	28,29±9,22 ab	1,77±0,7 2 ab	18,4±6,73 bc
Bouaké	16,4±0,1 8 a	51,27±0,91 b	17,86±6,69 b	0,89±0,0 24 ab	22,6±3,9 1 a	22±3,29 b	2,36±1,59 a	30,67±8,33 ab
Pr > F	0,751	0,0073	0,0327	0,0113	0,0043	0,0001	0,0134	0,001

Les valeurs portant les mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %.

Annexe 12 : tableau de l'influence de l'habitat et de la localité sur la morphologie des unités de croissance chez les vieux arbres de *Parkia biblobasa*

Habitats/Localités	Haut (m)	Diam (cm)	Long-MOD1 (cm)	Diam-MOD1 (cm)	Nbr-feuil-MOD1	Long-MOD2 (cm)	Diam-MOD2 (cm)	Nbr-feuil-MOD2
Psol	25.22±3.2 1 a	85.51±6.12 a	8.94±1.4 2 a	0.64±0. 05 b	8.62±0.7 b	13.76±2. 79 a	1.11±0. 11 a	14.12±1. 6 a
Sbs	25.3±3.32 a	76.58±7.36 a	15.46±8. 28 b	0.94±0. 09 a	12.4±2.3 a	13.22±5. 81 a	1.53±0. 38 a	16.8±6.2 6 a
Pr > F	0.454	0.3359	0.003	0.0098	0.0095	0.8974	0.0611	0.3894
Bouaké	21.7±7.4 a	115.6±11.4 a	6.4±0.13 a	0.53±0. 08 a	8±1.4 a	13.4±2.4 ab	1.2±0.0 4 ab	16±3.4 ab
Ferké	27.5±17. 85 a	112.25±36. 73 a	12.67±5. 9 a	0.87±0. 27 a	11.25±1. 25 a	7.65±2.1 4 b	1.4±0.1 6 ab	11.25±2. 36 b
Korhogo	28.61±2.8 1 a	69.04±5.21 b	10.72±1. 70 a	0.58±0. 03 a	11.3±1.7 6 a	14.61±3. 13 ab	0.86±0. 07 b	11.2±2.1 6 b
Katiola	22.1±11.2 3 a	76.48±19.03 b	10.8±3.3 7 a	0.88±0. 12 a	11±0.58 a	16.46±2. 64 ab	1.77±0. 08 a	15.33±1. 45 ab
Niakara	26.2±1.63 a	87.16±3.91 ab	11.97±5. 08 a	0.64±0. 07 a	9.75±2.1 7 a	14.55±3. 92 ab	0.8±0.0 6 b	18.25±3. 98 a
Toumodi	23±7.4 a	73.24±8.4 b	11.4±1.4 1 a	0.63±0. 13 a	6±0.83 a	24.6±3.4 a	1.23±0. 04 ab	17±5.1 a
Pr > F	0.3009	0.0098	0.9627	0.3962	0.4943	0.0079	0.003	0.008

Les valeurs portant les mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %.

Annexe 13 : images relatives à l'interface (a), composition (b) et sortie des paramètres d'ajustement calculés (c) du module Fit_GU du logiciel Groups (GreenLab Opérateur Universel des Plantes Simulées) implémenté dans Matlab

a

```

1 function [] = F_GU_main
2 clear all
3 close all
4 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
5 % FITTING A FUNCTION OR INTEGRAL WITH LEAST SQUARES METHOD
6 % Example with growth units with pre and post formation
7 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
8 clear all;
9 clear figures;
10 N=1;
11 Read_Targ=1;
12 Write_Targ=1;
13 Cumul=0;
14 if Read_Targ ==0
15 % Observation frequencies
16 Cu_A=20; % nb de UC par tige
17 %input('enter ID in GU:');
18 k1=5; %input('enter anom law k1:');
19 b1=0.7; %input('enter binom law b1:');
20 a1=0.2; %input('enter passage B1-B2 a1:');
21 k2=0; %input('enter binom law k2:');
22 b2=0.9; %input('enter binom law b2:');
23 N=1000; %input('enter Sample_size:');
24 Tab_Loc=zeros(Cu_A,1);
25 N0=zeros(Cu_A,1); % NPDones(Cu_A,1,1);
26 % sample simulation
    
```

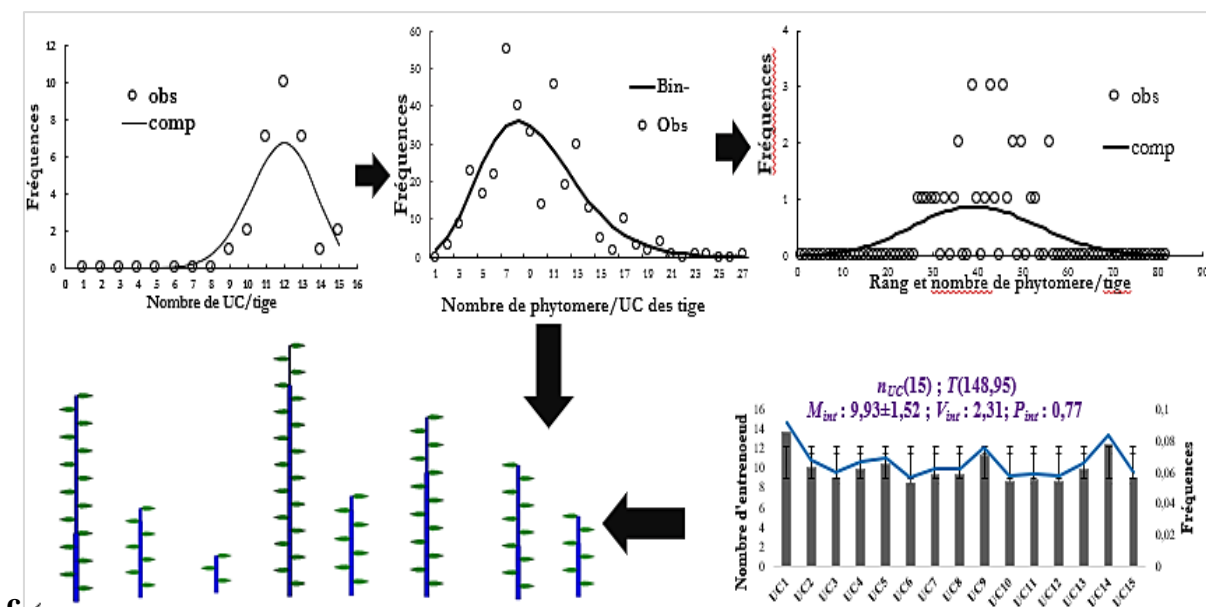
b

```

1 function [MS,Cu_A,k1,b1,a1,k2,b2,Tab_Loc] = F_GLUmain
2 clear variables
3 [name,path]=dir(fullfile('*.m','open parameter file 2'));
4 file_name=[path name];
5 fid = fopen(file_name,'r');
6 fprintf(fid,'%s','name');
7 sprintf(fid,'%s\n',name);
8 %%% = fecand(fid,'k1',1); % nb de GC in Cu_A
9 temp = fecand(fid,'k2',2);
10 info = temp;
11 Cu_A=info(1,1); MS=info(1,2);ncol=1;
12 temp = fecand(fid,'a1',3);
13 info = temp;
14 k1=info(1,1);k2=info(1,2);
15 temp = fecand(fid,'a2',3);
16 info = temp;
17 b1=info(1,1);b2=info(1,2);b3=info(1,3);
18 sprintf(fid,'%s\n',info);
19 for i=1:Cu_A
20 temp=fecand(fid,'k1',ncol);
21 info(1,1:ncol)=temp;
22 Tab_Loc(i,1)=info(1,1);
23 end
24 fclose(fid);
    
```

c

Duration_ofLaw	27	354	-2	0.7
Targ_Loc_GuChaya_nbr_phyto_p_indiv_Deltaum	3	-2	0.7	0.83
	0.76	0.9	0.75	0.7
	0			0.83
	0.008434876			0.73024
	0.025433729			0.26771
	0.054975751			0.260418
	0.048022999			0.773456
	0.06344693			0.777289
	0.55367232			0.775181
	0.3729385			0.77632
	0.09120339			0.8485115
	0.021548028			A= 0.775704
	0.127942503			a= 0.053277
	0.051972316			
	0.064345763			ms t
	0.026723164			
	0.01325234			0 0.0004
	0.009549718			0 0.0023
	0.028248588			0 0.0082
	0.008478276			0 0.0192
	0.005643718			0.0345 -0.0228



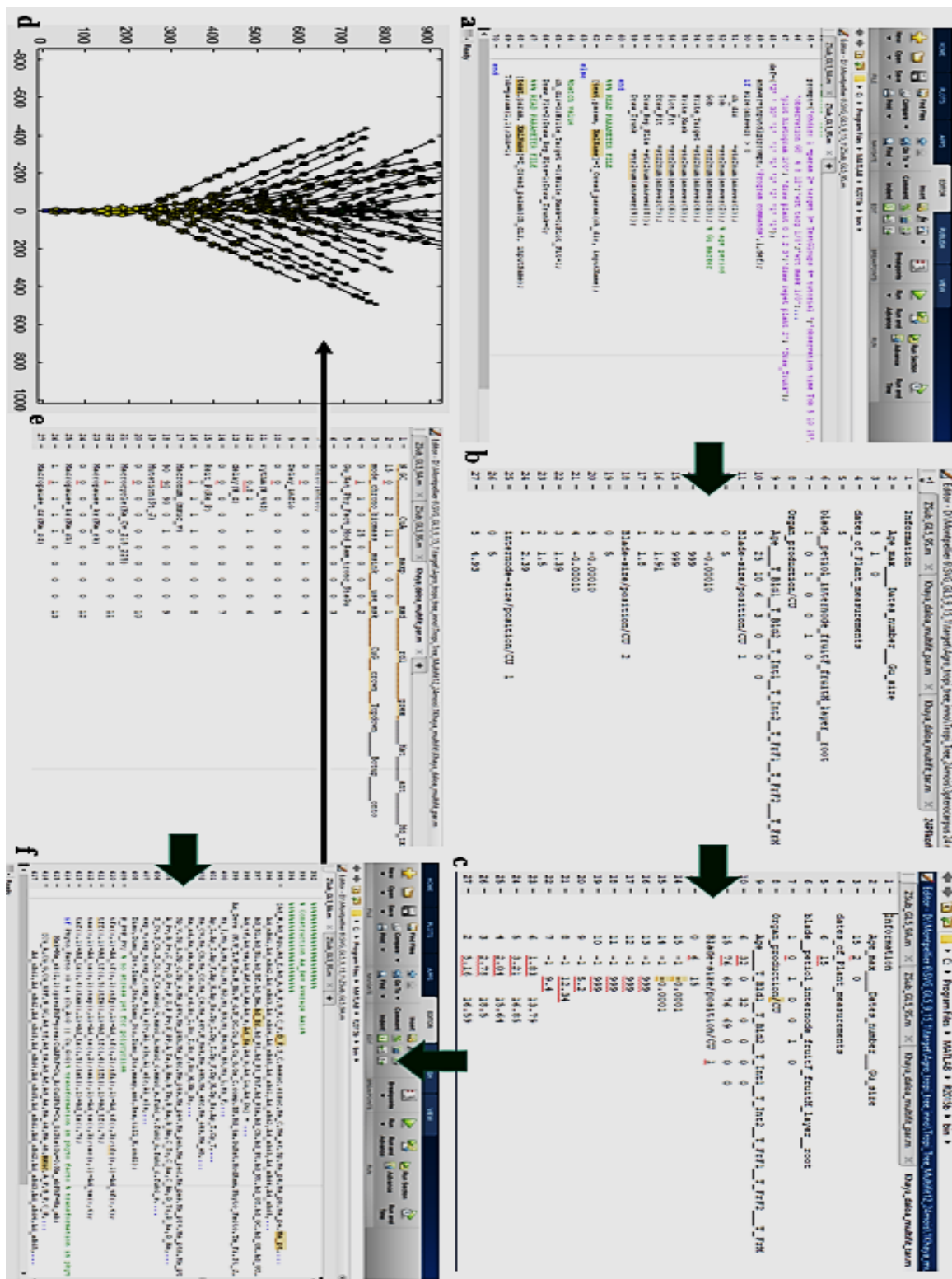
Annexe 14 : images relatives à l'organigramme de la simulation du développement des individus à partir du calcul des paramètres de développement dans le logiciel Groups du modèle Greenlab

The figure consists of four panels labeled a, b, c, and d, showing different stages of a software simulation process.

- Panel a:** A window titled 'ZSub_GS_35m' showing a grid of parameters. The grid has 13 columns and 24 rows. The first row is labeled 'size_of_stem_and_root_branch' and the second row is labeled 'list_of_phytomers_along_stem'. The grid contains numerical values, some in red, representing different parameter states.
- Panel b:** A window titled 'ZSub_GS_35m' showing a code editor with a script. The script includes comments and code for calculating parameters like 'death', 'growth', and 'reliability'. It uses functions like 'collect', 'figure', and 'size'.
- Panel c:** A window titled 'ZSub_GS_35m' showing a code editor with a script. The script includes comments and code for calculating parameters like 'death', 'growth', and 'reliability'. It uses functions like 'collect', 'figure', and 'size'.
- Panel d:** A window titled 'ZSub_GS_35m' showing a code editor with a script. The script includes comments and code for calculating parameters like 'death', 'growth', and 'reliability'. It uses functions like 'collect', 'figure', and 'size'.

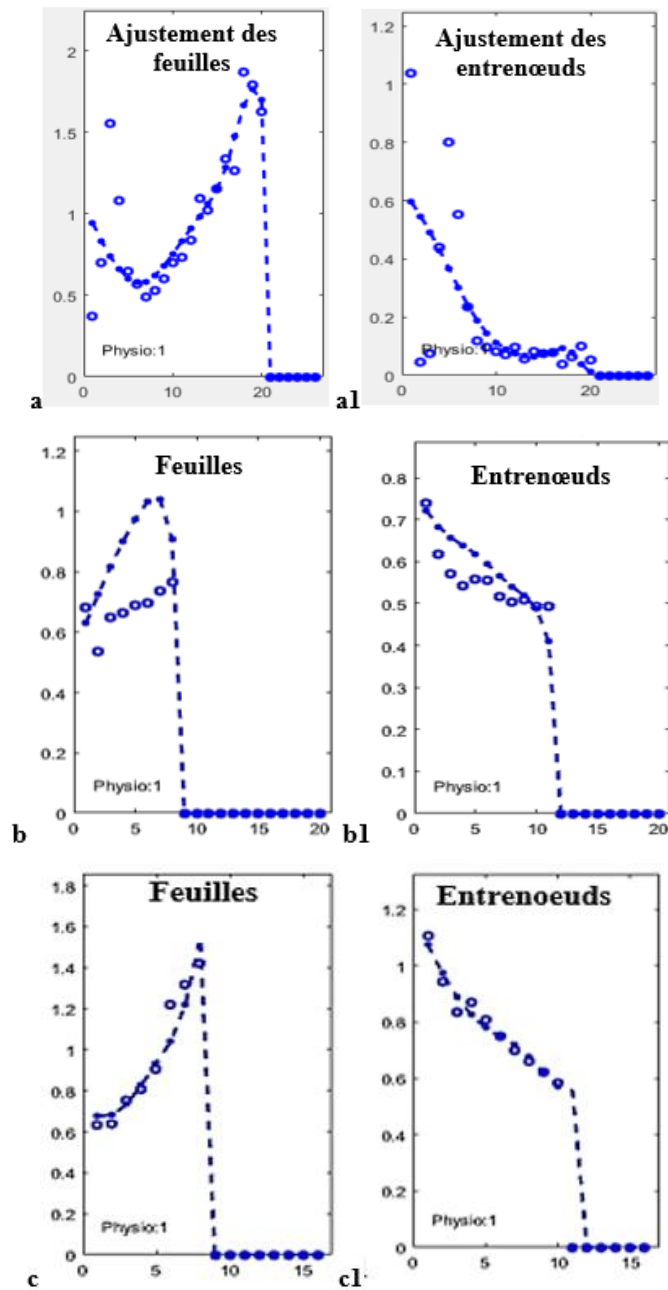
Arrows indicate the flow of information: from panel a to b, from b to d, and from c to d.

Annexe 15 : images relatives à l'organigramme de la simulation de la croissance dans le modèle Greenlab implémenté dans Matlab



Le simulateur `Zsub_GL_9S.m` (a) génère un fichier de série organique (b) qui sert à intégrer les données réelles de terrain (c), ensuite la carte paramétrique (e) de l'espèce est associée à la nouvelle série organique (c) pour être lu par le module `Zsub_GL_9A.m` (f) afin de simuler l'architecture (d) et calculer les paramètres cachés.

Annexe 16 : images relatives à l'ajustement des séries organiques des organes observées (cercle) et calculées (ligne) des feuilles (a b et c) et des entrenœuds (a1, b1 et c1) de la base au sommet de la tige chez les individus de 6 mois à Korhogo chez *Khaya senegalensis* (a et a1), *Pterocarpus erinaceus* (b et b1), *Parkia biglobosa* (c et c1).

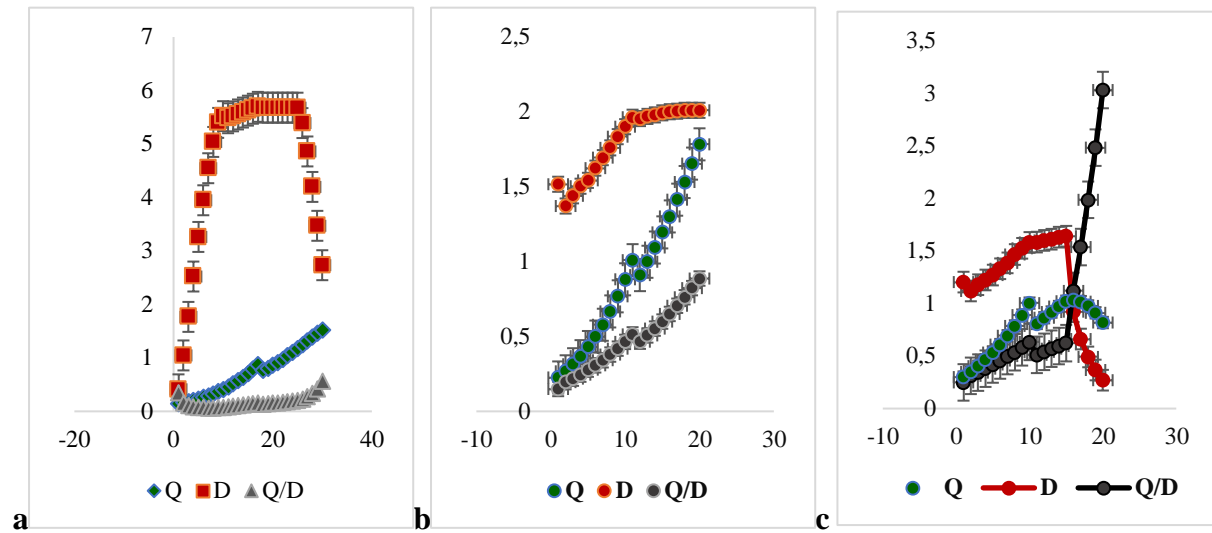


Annexe 17 : tableau des paramètres source-puits chez les individus de 6 mois à Korhogo

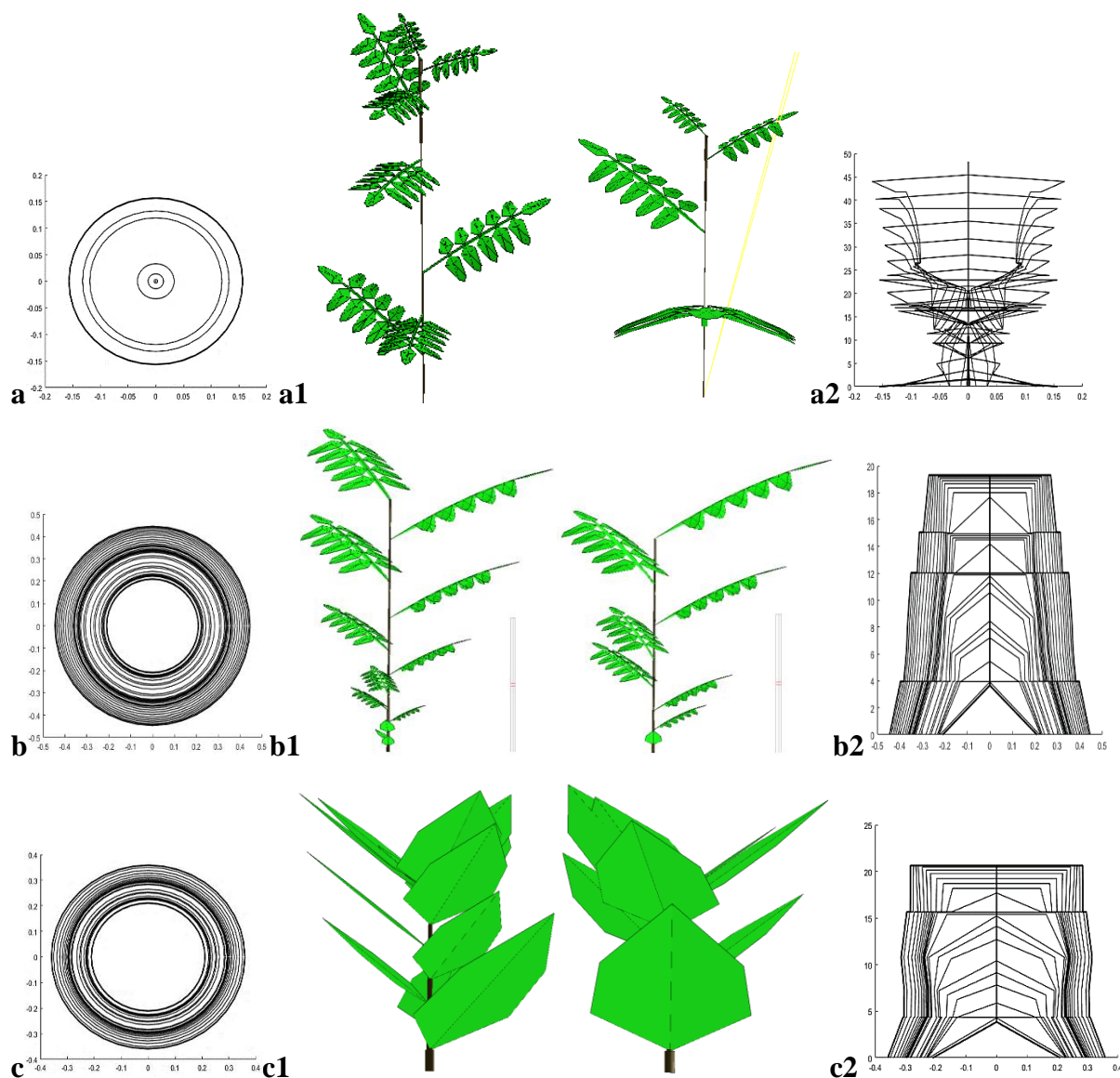
Espèces	<i>r</i>	<i>Sp</i>	<i>Q₀</i>	<i>Bb1</i>	<i>Bil</i>	<i>Pc</i>	<i>α</i>	<i>Pil</i>
<i>Khaya</i>	378,33±40,7	100000	1,25±0,27	1,71±0,59	-	0,05±0,013	1	0,11±0,1
Cv -%	11	-	22	35	-	25	-	102
<i>Pterocarpus</i>	76,42±27,2	100000	-	0,1±0,5	-	0,08±0,14	1	0,44±0,16
Cv -%	36	-	-	320	-	180	-	35
<i>Parkia</i>	94,53±3,28	100000	1,71±0,19	-	-	0,07±0,004	1	0,14±0,02
Cv -%	3	-	11	-	-	6	-	17

r=résistance ou efficacité climatique ou de l'eau, *SP*=surface de production, *Q₀*=biomasse initiale de la plante ou poids de la graine, *Bb1*=lois bêta de la variation des feuilles ou expansion des feuilles, *Bil*= lois bêta de la variation des entrenœuds ou expansion des entrenœuds, *Pc*= puit des cernes, *Pil*= puit des entrenœuds.

Annexe 18 : figures relatives à l'évolution de l'offre (Q), la demande (D) et du rapport d'offre-demande (Q/D) selon le rang des phytomères le long des tiges de 6 mois à Korhogo chez *Khaya* (a) *Pterocarpus* (b) et *Parkia* (c)

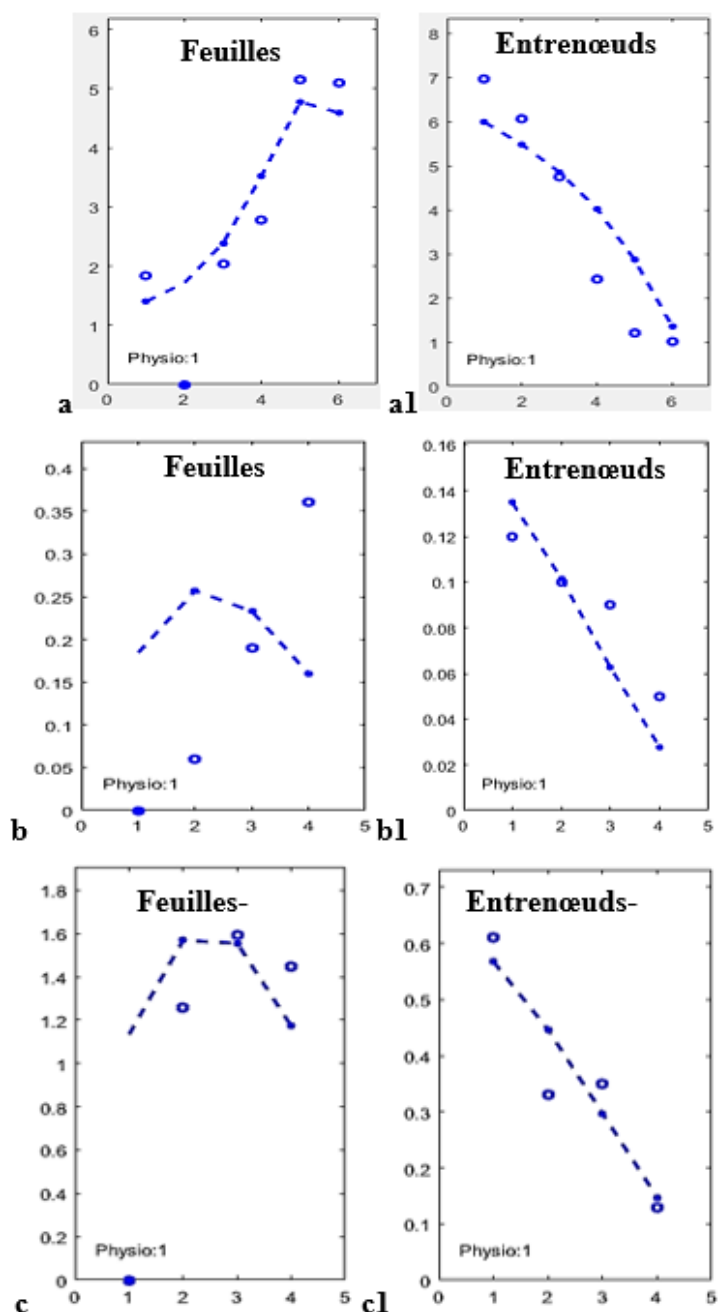


Annexe 19 : images relatives à la simulation par le modèle GreenLab de deux individus de 6 mois à Korhogo chez *Khaya* (a, a1 et a2), *Pterocarpus* (b, b1 et b2) et *Parkia* (c, c1 et c2).



Le profil de la tige montre que les parties dues à la moelle et à la croissance secondaire augmentent avec l'augmentation du diamètre de la tige (a2, b2 et C2). Le profil avec les anneaux (a1, b1 et C1) montre que la moelle est épaisse (blanc) par rapport au bois (anneaux noir) qui n'a pas encore entamé sa constitution (Logiciel Gloups).

Annexe 20 : figures relatives à l'ajustement des séries organiques composées observées (cercle) et calculées (ligne) des feuilles (a, b et c) et des entrenœuds (a1, b1 et c1) de la base au sommet de la tige d'individus de 12 mois à Korhogo chez *Khaya* (a et a1), *Pterocarpus* (b et b1) et *Parkia* (c et c1)

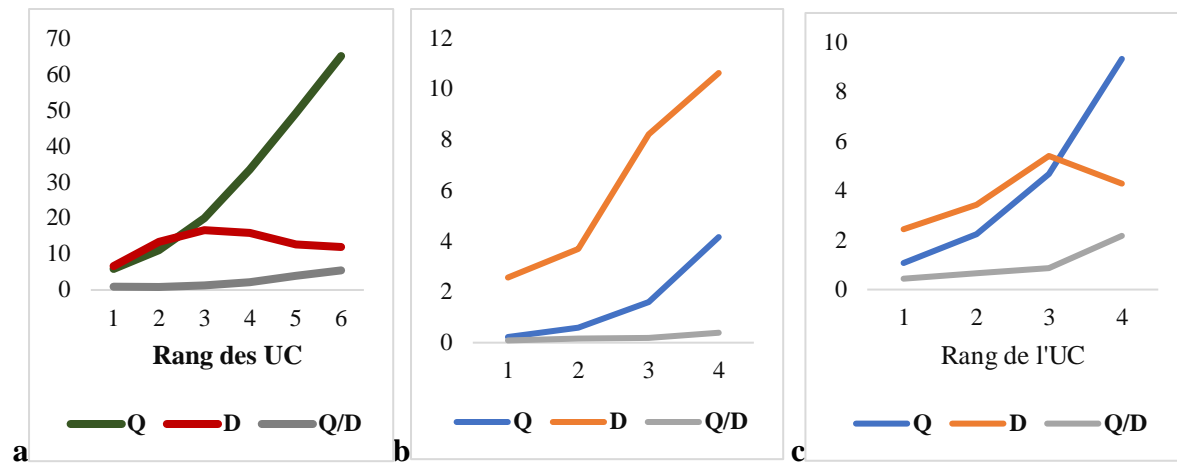


Annexe 21 : tableau des paramètres source-puits chez les individus de 12 mois à Korhogo

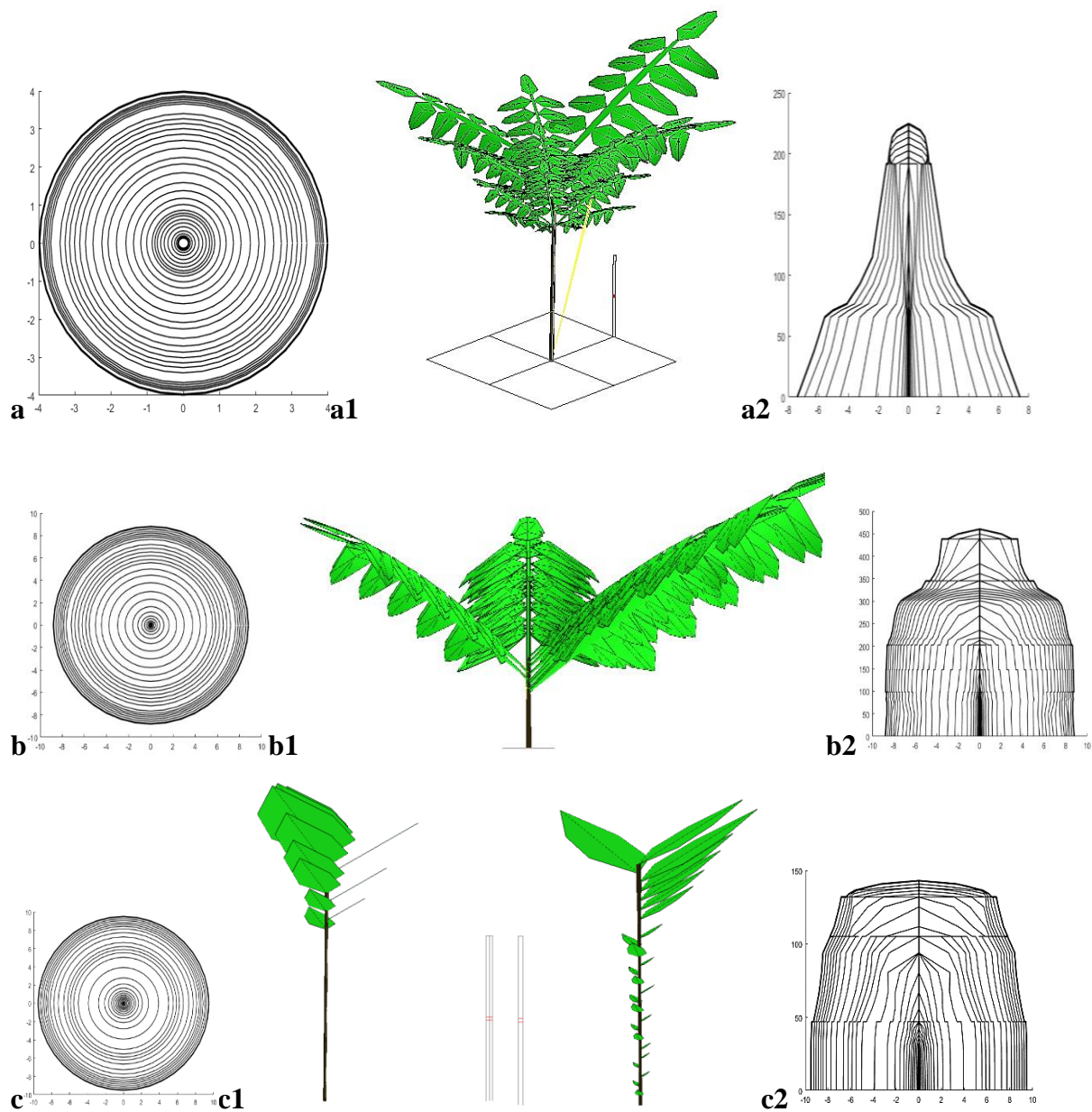
Espèces	<i>r</i>	<i>Sp</i>	<i>Q₀</i>	<i>Pc</i>	<i>λ</i>
<i>Khaya</i>	53,56±10,44	100000	11,99±4,42	0,47±0,06	1
Cv -%	19	-	37	13	-
<i>Pterocarpus</i>	9,28±0,95	100000	-	0,24±0,11	1
Cv -%	10	-	-	45	-
<i>Parkia</i>	15,11±1,33	100000	-	0,17±0,06	1
Cv -%	9	-	-	35	-

r=résistance ou efficacité climatique ou de l'eau, *SP*=surface de production, *Q₀*=biomasse initiale de la plante ou poids de la graine, *Pc*= puit des cernes.

Annexe 22 : figures relatives à l'évolution de l'offre (Q), la demande (D) et du rapport d'offre-demande (Q/D) selon le rang des UCs le long des tiges de 12 mois chez *Khaya* (a), *Pterocarpus* (b) et *Parkia* (c) à Korhogo (b)

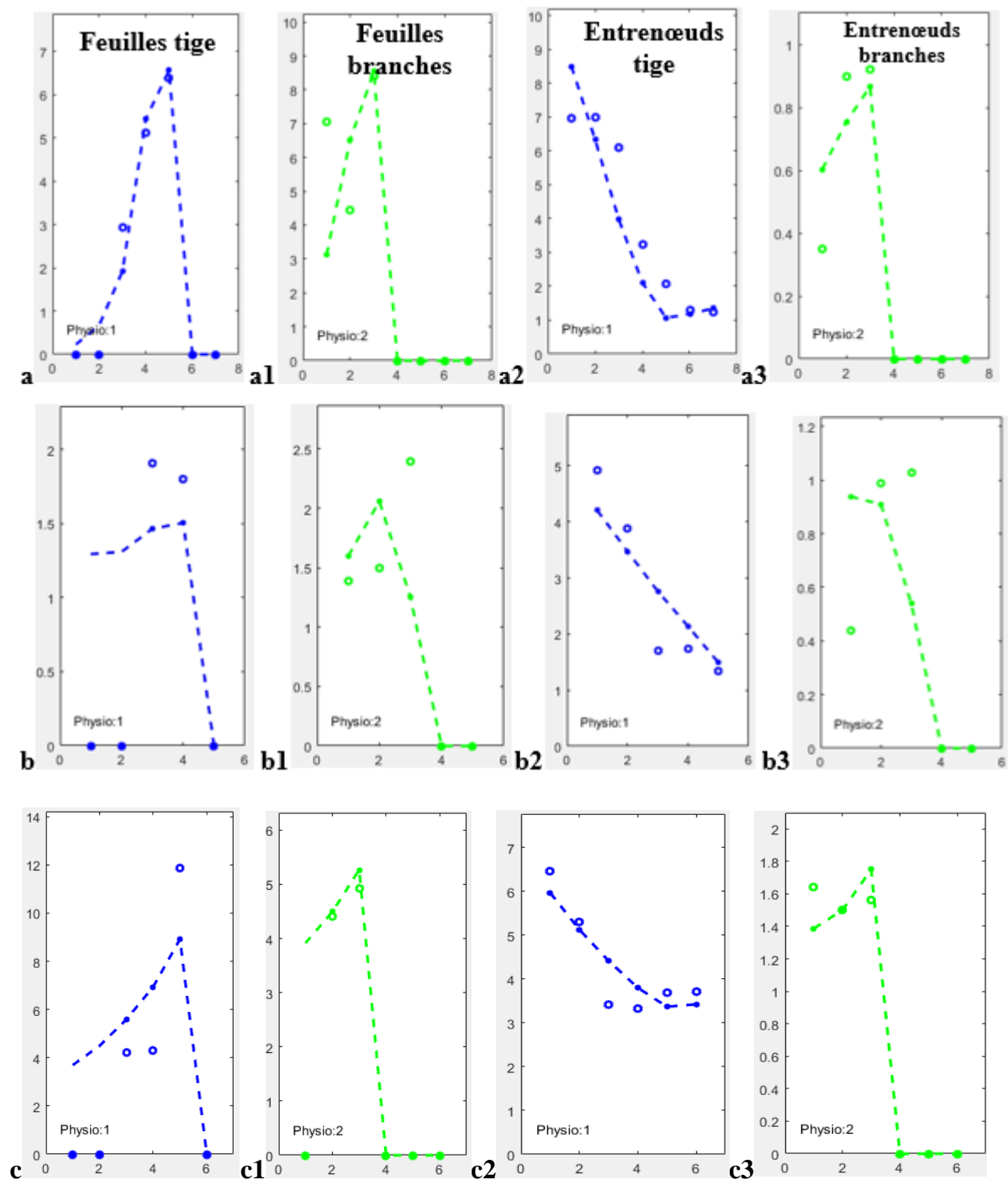


Annexe 23 : images relatives à la simulation d'un arbre de 12 mois à Korhogo chez *Khaya* (a, a1 et a2), *Pterocarpus* (b, b1 et b2) et *Parkia* (c, c1 et c2)



Les feuilles augmentent en taille le long de la tige de la base vers le sommet. Le profil des cerne avec les anneaux montre le début de la constitution du bois (a2, b2 et c2), les anneaux (a, b et c) sont de plus en plus répartis (anneaux noirs) que la moelle (cercle blanc). Le profil des cernes de la tige (a2, b2 et c2) montre la croissance rythmique et montre que la base de la tige est bien développée avec une grande quantité de bois que dans le sommet (Logiciel Groups).

Annexe 24 : figures relatives à l'ajustement des séries organiques observées (cercle) et calculées (ligne) des feuilles (a, b et c) et des entrenœuds (a2, b2 et c2) le long des tiges ; puis des feuilles (a1, b1 et c1) et des entrenœuds (a3, b3 et c3) le long des branches d'individus de 24 mois à Korhogo chez *Khaya* (a, a1, a2 et a3), *Pterocarpus* (b, b1, b2 et b3) et *Parkia* (c, c1, c2 et c3).

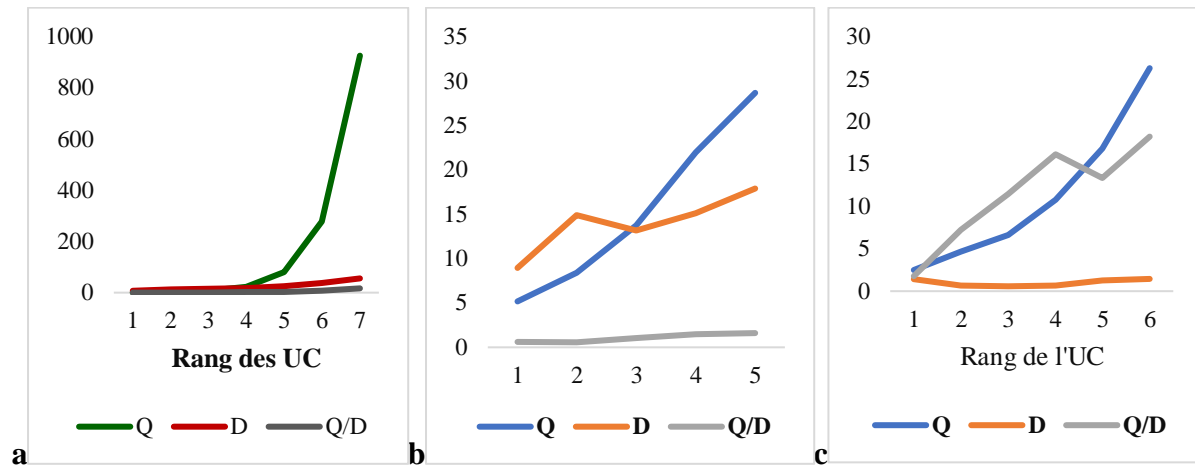


Annexe 25 : tableau des paramètres source-puits des individus de 24 mois à Korhogo

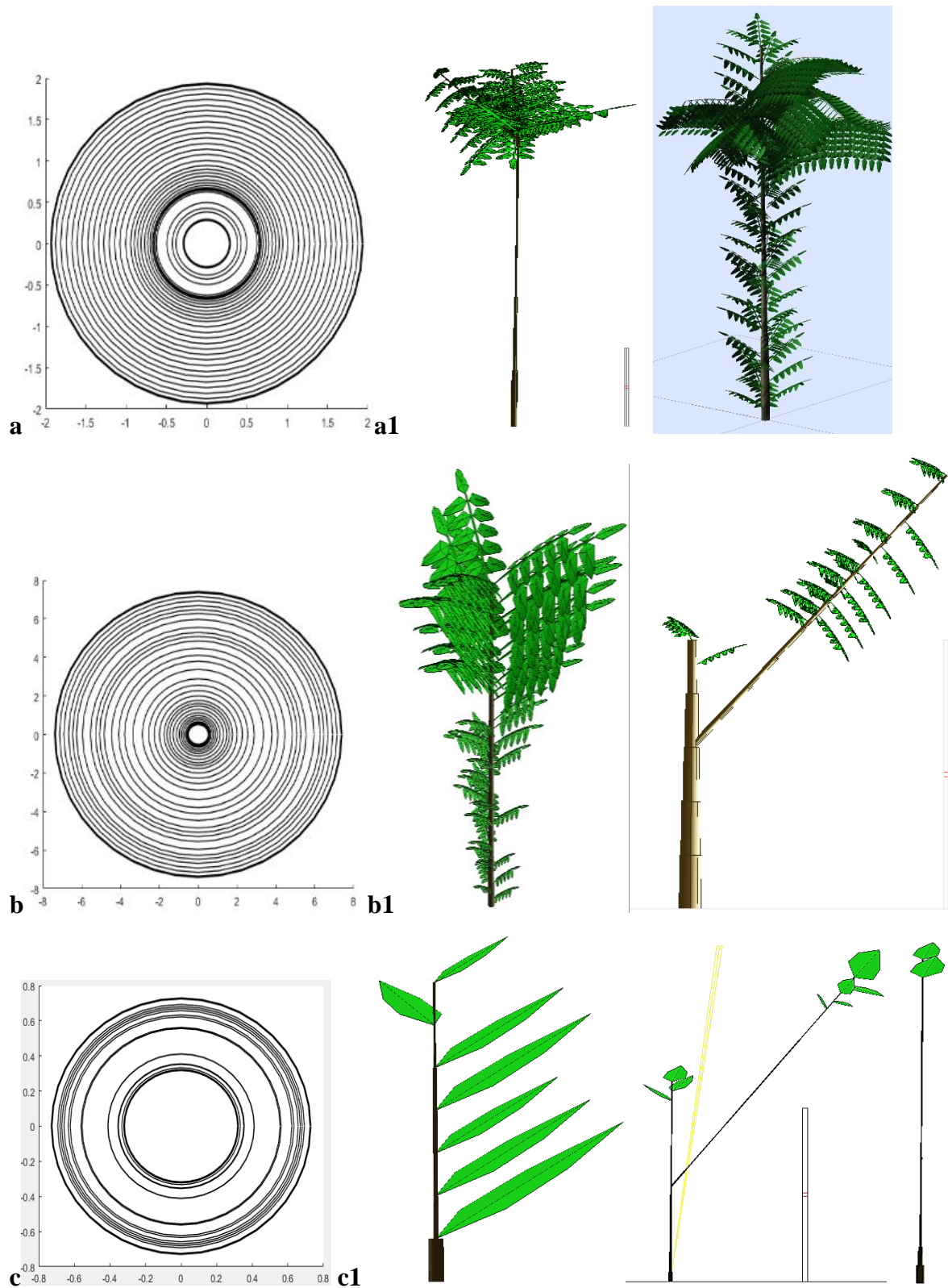
Espèces	<i>r</i>	<i>Sp</i>	<i>Q₀</i>	<i>Bb1</i>	<i>Bi1</i>	<i>Pc</i>	<i>Pb2</i>	<i>Bc1</i>	<i>α</i>	<i>Pi1</i>	<i>Pi2</i>
<i>Khaya</i>	15,35±3,3	1000	-	0,46±	0,36±	0,41±0,	1,35±	3,52±	1	0,21±	0,13±
	8	00		0,41	1,38	12	0,3	1,2		0,24	0,06
Cv -%	19	-	-	90	382	30	22	34	-	119	43
<i>Pteroca</i>	72,58±2	1000	-	-	-	0,55±	-	-	1	0,71±	0,43±
<i>rpus</i>	9,84	00				0,28				0,6	0,25
Cv -%	41	-	-	-	-	50	-	-	-	139	34
<i>Parkia</i>	76,23±63,	1000	7,37±1	-	-	0,13±0,	-	-	1	0,36±	0,16±
	86	00	1,92			17				0,48	0,2
Cv -%	84	-	162	-	-	131	-	-	-	136	121

r=résistance ou efficacité climatique ou de l'eau, *SP*=surface de production, *Q₀*=biomasse initiale de la plante ou poids de la graine, *Bc1*=lois bêta de la variation de l'expansion des cernes, *Bb1*= loi bêta d'expansion des feuilles, *Bi1*=lois bêta d'expansion des entrenœuds, *Pc*= puit des cernes, *Pb*=puit des feuilles, *Pi1*= puit des entrenœuds, *I*=tiges, *2*=branches.

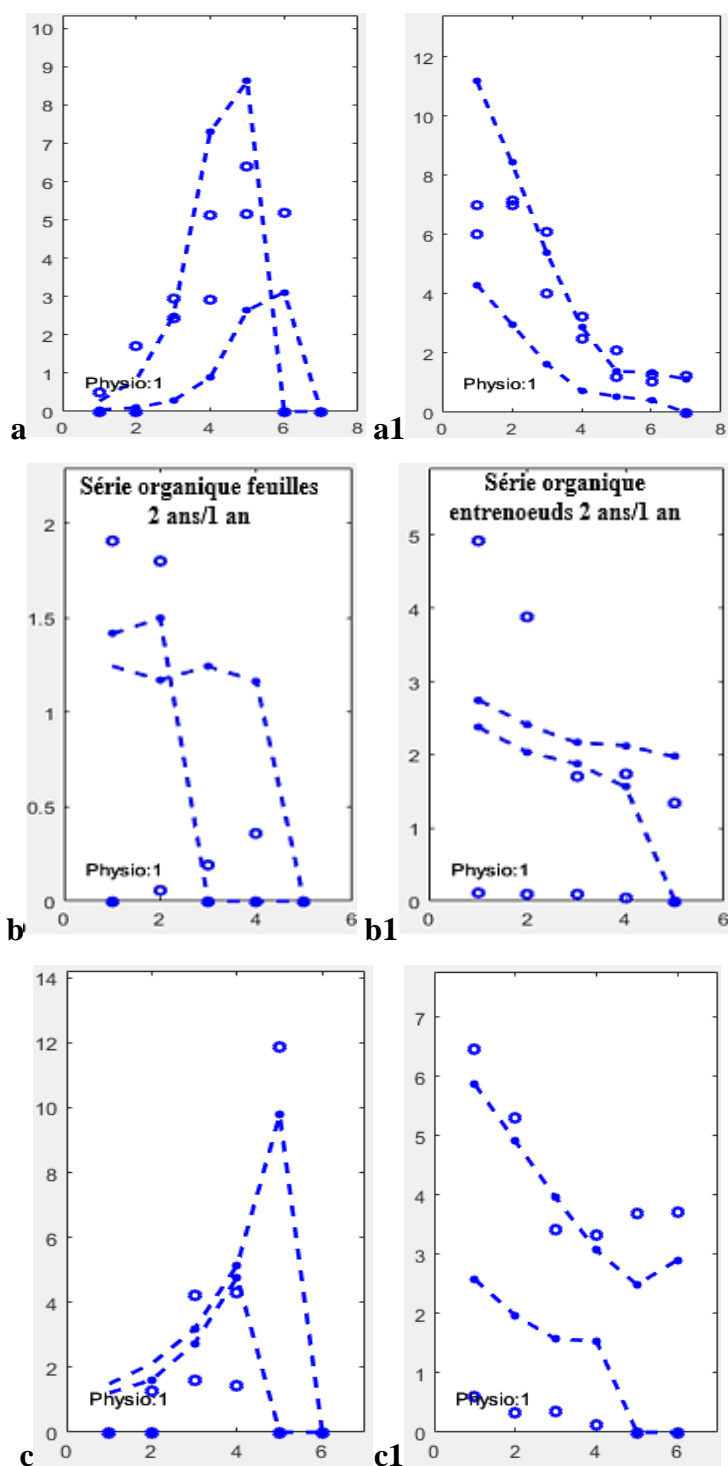
Annexe 26 : figures relatives à l'évolution de l'offre (Q), la demande (D) et du rapport offre-demande (Q/D) selon le rang des UCs des tiges de 24 mois à Korhogo chez *Khaya* (a), *Pterocarpus* (b) et *Parkia* (c)



Annexe 27 : images relatives à la simulation d'individus de 24 mois à Korhogo chez *Khaya* (a, a1 et a2), *Pterocarpus* (b, b1 et b2) et chez *Parkia* (c, c1 et c2)



Annexe 28 : figures relatives à l'ajustement multi-stade des séries organiques observées (cercle) et calculées (Courbes) des feuilles (a, b et c) et des entrenœuds (a1, b1 et c1) des tiges à 12 et 24 mois à Korhogo chez *Khaya* (a et a1, $R^2=0,95$), *Pterocarpus* (b et b1, $R^2=0,9$) et *Parkia* (c et c1, $R^2=0,53$)

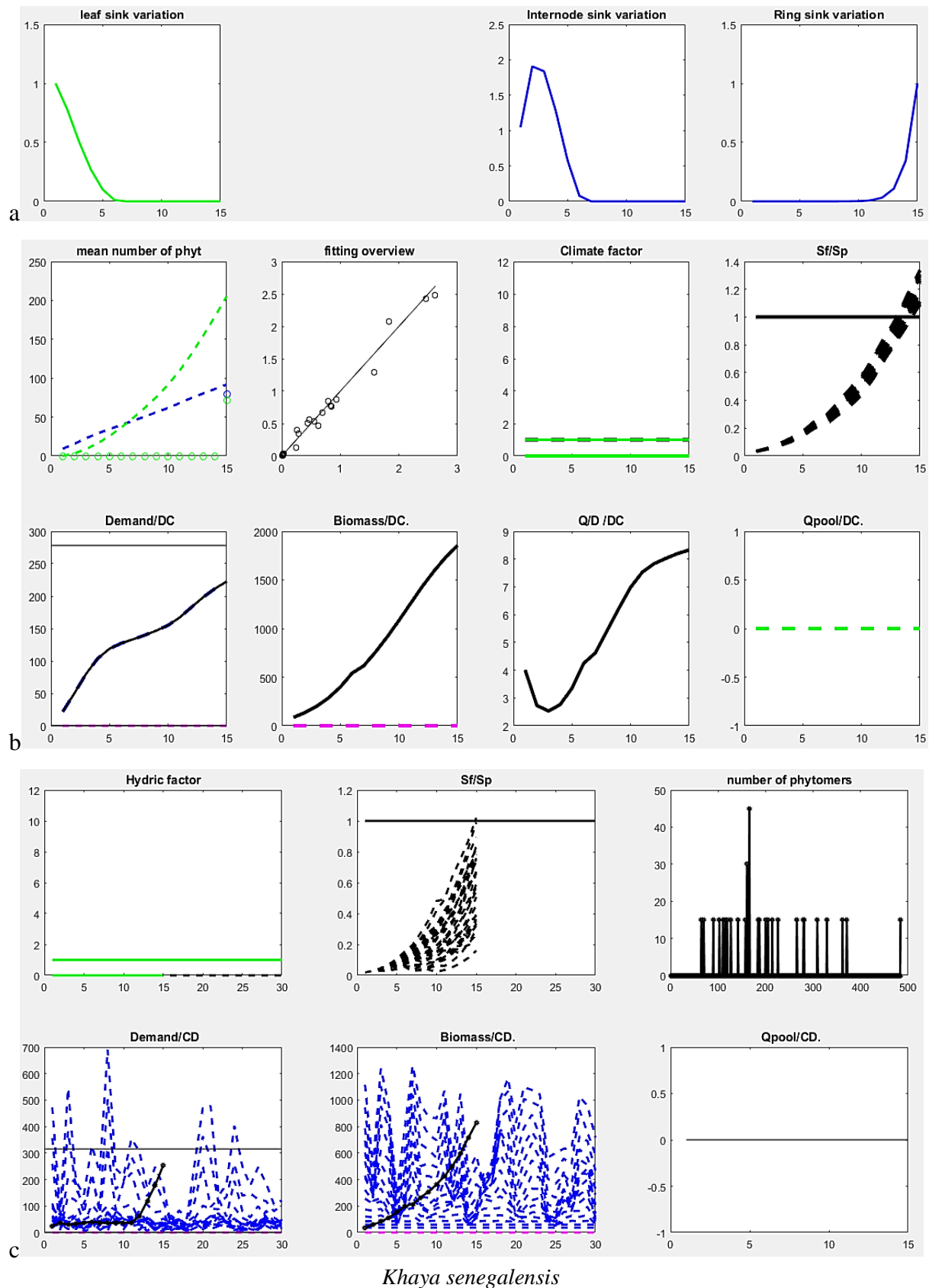


Annexe 29 : tableau des paramètres source-puits du multi-ajustement des stades 12 et 24 mois chez les espèces cibles à Korhogo

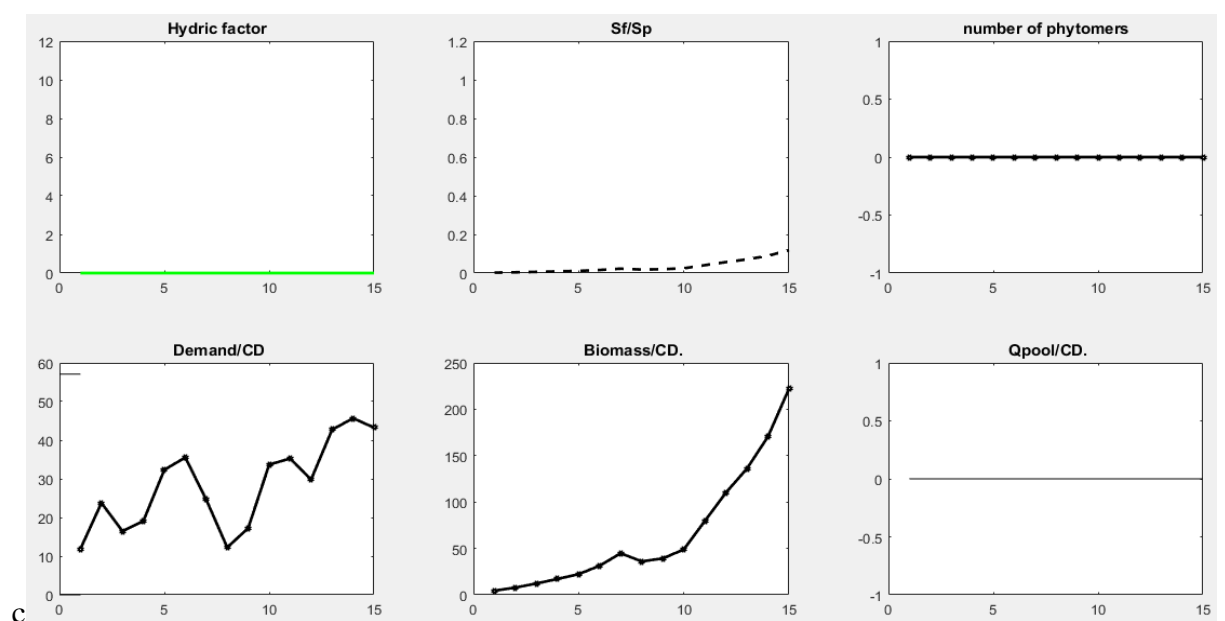
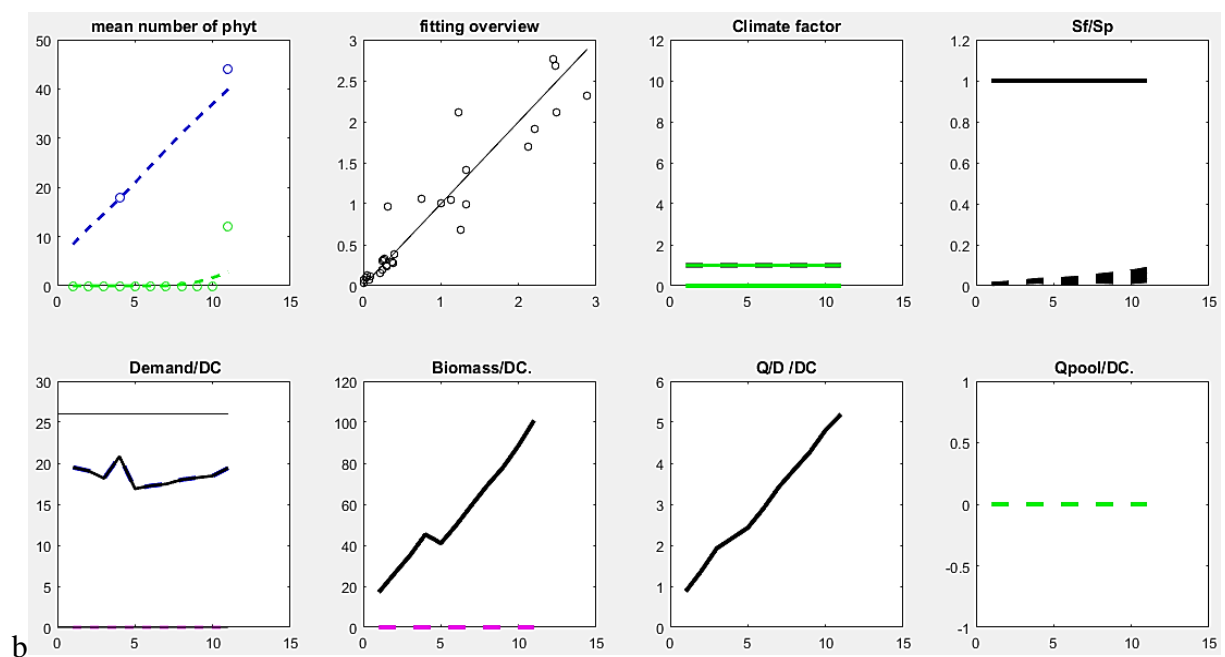
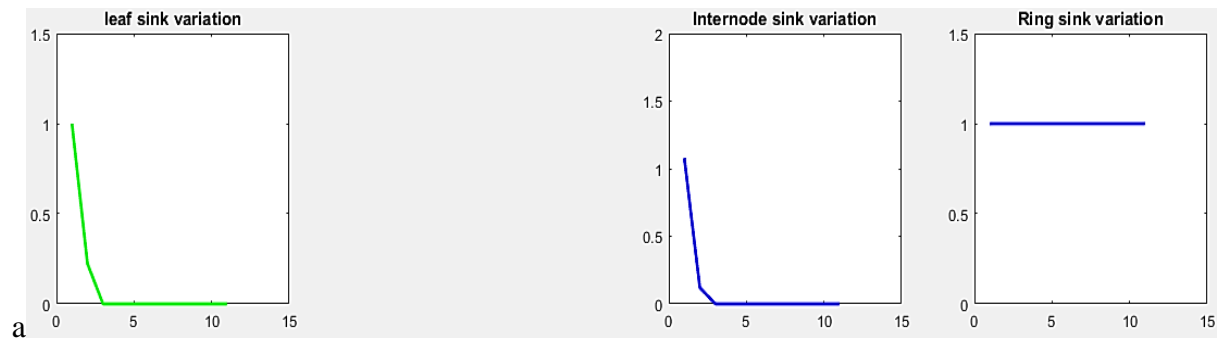
Espèces	<i>r</i>	<i>Q</i>₀	<i>Bb1</i>	<i>Bi1</i>	<i>Pc</i>	<i>Pb2</i>	<i>Bc1</i>	<i>Pi1</i>	<i>Pi2</i>
<i>Khaya</i>	12,98±	-	0,55±	0,23±	0,51±0,	1,21±1,3	0,01±1	0,38±1,	0,91±0,9
<i>senegalensis</i>	7,89		1,17	0,83	47	1	09,88	88	2
<i>Cv</i> -%	61	-	309	359	93	108	109875	495	489
<i>Pterocarpus</i>	42,04±8	-	-	-	0,24±0,1	-	-	1,2±0,6	0,53±0,1
<i>erinaceus</i>	,44				6			2	
<i>Cv</i> -%	20	-	-	-	69	-	-	52	18
<i>Parkia</i>	0,05±0,	17,65±	-	-	0,35±0,1	-	-	0,074±	0,19±0,7
<i>biglobosa</i>	009	1384,1			2			0,16	
<i>Cv</i> -%	17	162	-	-	35	-	-	216	38

r=résistance ou efficacité climatique ou de l'eau, *SP*=surface de production, *Q*₀=biomasse initiale de la plante ou poids de la graine, *Bc1*=lois bêta de la variation de l'expansion des cernes, *Bb1*= loi bêta d'expansion des feuilles, *Bi1*=lois bêta d'expansion des entrenœuds, *Pc*= puit des cernes, *Pb*=puit des feuilles, *Pi1*= puit des entrenœuds, *1*=tiges, *2*=branches.

Annexe 30 : fonctions de variation de lois Bêta de l'évolution des puits d'UC pour les compartiments feuilles, entrenœuds et cernes (a) et des paramètres source-puits (b et c) du multi-ajustement chez *Khaya senegalensis*

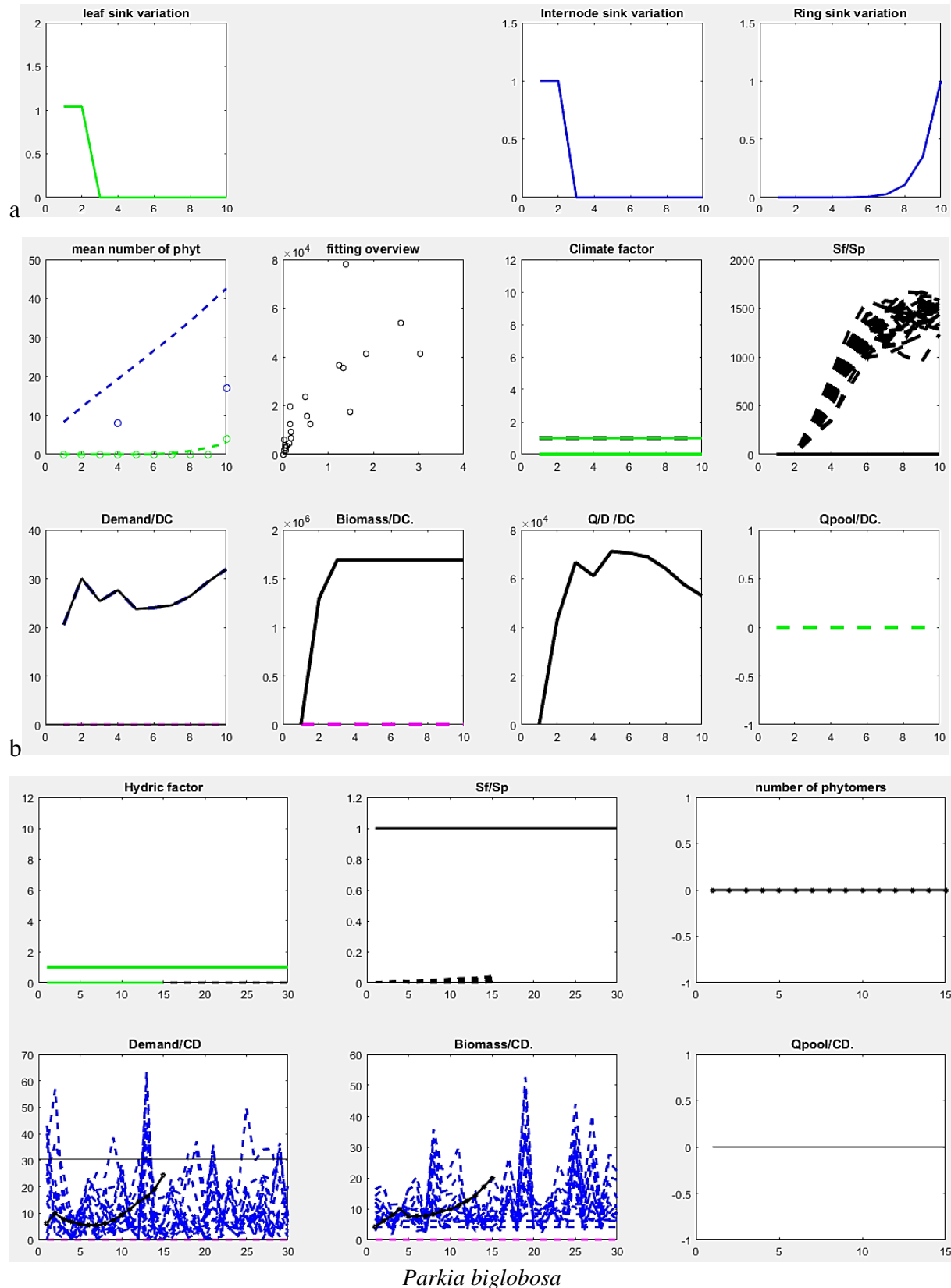


Annexe 31 : fonctions de variation de lois Bêta de l'évolution des puits d'UC pour les compartiments feuilles, entrenœuds et cernes (a) et des paramètres source-puits (b et c) du multi-ajustement chez *Pterocarpus erinaceus*



Pterocarpus erinaceus

Annexe 32 : fonctions de variation de lois Bêta de l'évolution des puits d'UC pour les compartiments feuilles, entrenœuds et cernes (a) et des paramètres source-puits (b) du multi-ajustement chez *Parkia biglobosa*



Annexe 33 : liens de disponibilité des données de thèse dans un entrepôt numérique de données selon le principe « FAIR : data Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable » (Dataverse and Digital Object Identifier)

Adji, Beda Innocent, 2022, "Quality seed production for optimising the success of reforestation of native forest species: case of *Khaya senegalensis* (Meliaceae), *Pterocarpus erinaceus* (Fabaceae) and *Parkia biglobosa* (Fabaceae)", <https://doi.org/10.7910/DVN/AEH9TP>, Harvard Dataverse, V1.

Adji, Beda Innocent, 2022, "Growth unit morphology and biomass in *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. (Meliaceae), *Pterocarpus erinaceus* Poir. (Fabaceae) and *Parkia biglobosa* (Fabaceae) according to habitat and climate in Côte d'Ivoire", <https://doi.org/10.7910/DVN/I37ABC>, Harvard Dataverse, V1.

Adji, Beda Innocent, 2022, "Structure and function modeling of young tree in *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* and *Parkia biglobosa*", <https://doi.org/10.7910/DVN/KCXY2Z>, Harvard Dataverse, V1.

Résumé

La déforestation menace gravement l'environnement et la biodiversité dans le monde et particulièrement en Côte d'Ivoire. Il est urgent de développer des stratégies nouvelles de préservation de l'environnement et de gestion durable de la biodiversité. Cette étude vise à optimiser la culture de trois espèces forestières indigènes fortement exploitées en Côte d'Ivoire, que sont *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* et *Parkia biglobosa*. Dans un premier temps, 1080 graines et 360 plantules par espèce ont été utilisées pour une étude de germination et de croissance de semis dans deux environnements distincts (sec et humide). Ensuite, une analyse architecturale et rétrospective d'axes dans la cime de 360 individus jeunes, adultes et vieux par espèce ont été réalisées dans deux habitats (milieu ouvert et sous-bois) de six localités suivant un gradient bioclimatique Sud-Nord en Côte d'Ivoire. Enfin, les paramètres de développement ont été calculés grâce au processus de *Montecarlo*, tandis que la croissance secondaire et les relations source-puits ont été calibrées avec la loi de *Pressler* à l'aide de la méthode des moindres carrés via le modèle structure-fonction GreenLab, sur un échantillon de 180 plants âgés de 6, 12 et 24 mois par espèce. Les résultats ont montré que les grosses graines de *Khaya senegalensis* (0,25-0,37 g), *Pterocarpus erinaceus* (0,08-0,15 g) et de *Parkia biglobosa* (0,2-0,32 g) sont des semences de qualité pouvant produire des semis performants pour l'optimisation de la réussite du reboisement. L'analyse rétrospective a permis d'identifier les difficultés de développement et les zones favorables (Katiola, Bouaké et Toumodi) à la culture des espèces cibles. L'analyse architecturale a permis d'établir l'unité et les caractéristiques architecturales des espèces cibles. *Khaya senegalensis* suit le modèle architectural de Rauh avec 4 catégories d'axe, alors que *Pterocarpus erinaceus* et *Parkia biglobosa* suivent le modèle de Troll avec 3 catégories d'axe. Les lois d'activités méristématiques couplées aux puits des organes (D : Demande), à la photosynthèse (Q : Offre) et aux séries organiques (Q/D : Pression trophique et expansion d'organe des lois Bêta), ont permis de simuler l'architecture des espèces en imagerie de synthèse 3D. Ces résultats nouveaux permettent d'aboutir à un modèle de plante computationnelle adaptées aux besoins de la sylviculture sous un nouvel angle. Ils permettent d'envisager de nouvelles applications agronomiques et forestières en Côte d'Ivoire. Ces résultats représentent des outils d'aides importants pouvant contribuer à la gestion durable des espèces cibles et servir de base de restructuration de la politique de régénération de la forêt en Côte d'Ivoire.

Mots clés : Architecture, modélisation, *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus*, *Parkia biglobosa*, Côte d'Ivoire.

Abstract

Deforestation is a serious threat to the environment and biodiversity worldwide and particularly in Côte d'Ivoire. There is an urgent need to develop new strategies for environmental preservation and sustainable biodiversity management. This study aims to optimise the cultivation of three heavily exploited native forest species in Côte d'Ivoire, namely *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* and *Parkia biglobosa*. First, 1080 seeds and 360 seedlings per species were used for a germination and growth study of seedlings in two distinct environments (dry and humid). Then, an architectural and retrospective analysis of axes in the crown of 360 young, adult and old individuals per species was carried out in two habitats (open environment and undergrowth) in six localities following a South-North bioclimatic gradient in Côte d'Ivoire. Finally, developmental parameters were calculated using the *Montecarlo* process, while secondary growth and source-sink relationships were calibrated with *Pressler's* law using the generalized least squares method through the GreenLab structure-function model, on a sample of 180 plants aged 6, 12 and 24 months per species. The results showed that large seeds of *Khaya senegalensis* (0.25-0.37 g), *Pterocarpus erinaceus* (0.08-0.15 g) and *Parkia biglobosa* (0.2-0.32 g) are quality seeds that can produce efficient seedlings for optimising reforestation success. The retrospective analysis made it possible to identify development difficulties and favourable areas (Katiola, Bouaké and Toumodi) for the cultivation of the target species. The architectural analysis established the unity and architectural characteristics of the target species. *Khaya senegalensis* follows Rauh's architectural model with 4 axis categories, while *Pterocarpus erinaceus* and *Parkia biglobosa* follow Troll's model with 3 axis categories. The meristematic activity laws coupled with organ sinks (D : Demand), photosynthesis (Q : Offer) and organic series (Q/D : Trophic pressure and organ expansion of Beta laws), have allowed to simulate the architecture of the species in 3D synthetic imaging. These new results lead to a computational plant model adapted to the needs of forestry from a new angle. They make it possible to envisage new agronomic and forestry applications in Côte d'Ivoire. These results represent important support tools that can contribute to the sustainable management of target species and serve as a basis for restructuring forest regeneration policy in Côte d'Ivoire.

Key words: Architecture, modelling, *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus*, *Parkia biglobosa*, Côte d'Ivoire.

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES ISSUES DE LA
THESE

PUBLICATION 1

Beda Innocent Adji, Doffou Sélastique Akaffou, Kouadio Henri Kouassi, Yao Patrice Houphouet, Jérôme Duminil and Sylvie Sabatier. **2020**.

INFLUENCE OF DIFFERENT ENVIRONMENTS ON GERMINATION PARAMETERS
AND SEEDLING MORPHOLOGY IN *KHAYA SENEGALENSIS* (DESR.) A. JUSS
(MELIACEAE). *American Journal of Plant Sciences*, 11, 1579-1600.

<https://doi.org/10.4236/ajps.2020.1110114>

Influence of Different Environments on Germination Parameters and Seedling Morphology in *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss (Meliaceae)

Beda Innocent Adji, Sélastique Doffou Akaffou, Kouadio Henri Kouassi, Yao Patrice Houphouet, Jérôme Duminil, Sylvie-Annabel Sabatier

► **To cite this version:**

Beda Innocent Adji, Sélastique Doffou Akaffou, Kouadio Henri Kouassi, Yao Patrice Houphouet, Jérôme Duminil, et al.. Influence of Different Environments on Germination Parameters and Seedling Morphology in *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss (Meliaceae). American Journal of Plant Sciences, Scientific Research Publishing, 2020, 11 (10), pp.1579-1600. 10.4236/ajps.2020.1110114 . hal-03141198

HAL Id: hal-03141198

<https://hal.inrae.fr/hal-03141198>

Submitted on 15 Feb 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Influence of Different Environments on Germination Parameters and Seedling Morphology in *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss (Meliaceae)

Beda Innocent Adji^{1,2*}, Sélastique Doffou Akaffou¹, Kouadio Henri Kouassi¹, Yao Patrice Houphouet¹, Jérôme Duminil³, Sylvie Sabatier²

¹Université Jean Lorougnon Guédé, Agroforestry UFR, Departement for Seeds and Seedlings Production, Daloa, Côte d'Ivoire

²CIRAD, UMR AMAP, Montpellier, France AMAP, Université Montpellier, CIRAD, CNRS, INRA, IRD, Montpellier, France

³IRD, UMR-DIADE, Montpellier Cedex 5, France

Email: *adjibedainnocent@gmail.com

How to cite this paper: Adji, B.I., Akaffou, S.D., Kouassi, K.H., Houphouet, Y.P., Duminil, J. and Sabatier, S. (2020) Influence of Different Environments on Germination Parameters and Seedling Morphology in *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss (Meliaceae). *American Journal of Plant Sciences*, 11, 1579-1600.

<https://doi.org/10.4236/ajps.2020.1110114>

Received: September 8, 2020

Accepted: October 23, 2020

Published: October 26, 2020

Copyright © 2020 by author(s) and Scientific Research Publishing Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Khaya senegalensis is one of the largest and most majestic trees in Africa. Overexploited for its precious wood and medicinal values, the natural stands of this species are in danger of extinction in Côte d'Ivoire. Its sustainable management through regeneration techniques and assessment of its degree of adaptation to the changing climate is necessary. The aim of this study is to evaluate the effect of different environments on seedling germination and development in *Khaya senegalensis*. A total of 2160 seeds from different mother plants and 540 individuals from seed germination were selected and evaluated. The trials were conducted on three sites that were distinct by their microclimate (two nurseries in Côte d'Ivoire and one greenhouse in France). Analysis of variance showed that germination and morphology parameters were not influenced by the characteristics of the mother plants used ($p > 0.05$), but rather by the study sites ($P < 0.05$). The stable and controlled greenhouse climate was more advantageous for latency time (12.66 ± 0.80 days), germination delay (16.96 ± 0.54 days), germination speed (19.66 ± 2.95 days), germination duration (10.83 ± 2.27 days) and germination rate (88.88 ± 7.97) with more vigorous sowing than the other two sites. The results showed in general that the higher the height of the seedlings, the thicker the diameter of the seedlings ($r = 0.796$) and the higher the number of leaves ($r = 0.946$). This savannah species is native to the arid zones of Africa, but this study highlighted its adaptive potential to changing and different climates. These results are decision support tools for the regeneration of native pioneer forest species with high agroforestry potential and socio-economic impor-

tance such as *Khaya senegalensis*. This study could be extended to other species in order to restore disturbed ecosystems.

Keywords

Khaya senegalensis, Environments, Germination Parameters, Greenhouse, Côte d'Ivoire

1. Introduction

Forests play an important role in maintaining plant genetic resources, soil conservation, watershed stability, etc. [1]-[7]. In Africa, forests occupy almost 650 million hectares and provide foreign exchange and ecosystem services that meet the needs of local populations [8]-[13]. However, anthropogenic activities of all kinds (extensive, itinerant and migratory agriculture, bush fires, anarchic exploitation of certain resources, animal raving, etc.) and a galloping population are exerting a strong, non-discreet and increasing pressure on forest ecosystems [14] [15].

In sub-Saharan Africa, many species are threatened with extinction in forests due to overexploitation. Approximately 55% of plant species, of which 10% have disappeared in the wild [16] [17] [18]. Thus, species whose economic and socio-cultural activity plays a key role in meeting human health needs are the most threatened [14] [19] [20] [21]. In West Africa, access, exploitation and sustainable management of plant resources are a major issue for rural populations [22]. Indeed, sustainable management of forest resources means the management and use of forests and wooded areas in such a way and at such an intensity that they maintain their biological diversity, productivity, regeneration capacity, vitality and ability to satisfy, now and in the future, relevant ecological, economic and social functions at local, national and global levels, and that they do not cause damage to other ecosystems [23]. Thus, controlling the regeneration of local woody species remains the keystone of sustainable strategic management of arid and semi-arid vegetation types in West Africa [24].

In Côte d'Ivoire, the loss of forest cover has led to severe climate change [25] [10]. To solve this problem, forest management structures are trying to fill this gap with fast-growing exotic species such as *Tectona grandis* instead of local species. This drama, which is upsetting the local ecological balance, has been pointed out by the rural population. The Ivorian state therefore demands and prioritises forest management and agroforestry with local indigenous species.

Khaya senegalensis, commonly known as caïlcédrat or Senegalese mahogany, is a tree of the Meliaceae family that can grow up to 35 m high with a very thick, scaly bark that ranges in colour from brownish to dark grey. Its trunk is very thick with a generally short and stocky appearance, up to 2 m in diameter, sometimes with a small serif at the base. Its leaves are arranged at the tips of the branches and form dense foliage [26] [27] [28] [29]. This species is native to the

Sahelo-Sudanian and Sudanese zone of tropical Africa [26] [28] [30] [31] [32]. *Khaya senegalensis* is a species with multiple uses (pharmacopoeia, urban forestry, shade, firewood, timber, etc.) that is highly prized by rural populations [28] [29] [30] [32] [33] [34] [35] [36]. This species is subject to excessive and anarchic over-exploitation, exposing it to a loss of diversity that could eventually lead to its extinction [30] [37] [38].

In Côte d'Ivoire, the decline of *Khaya senegalensis* stands is increasingly worrying. Its stands have become very rare in its area of distribution. Moreover, the effects of climate change do not favour the natural and rapid regeneration of this species. It is therefore necessary and urgent to develop artificial regeneration techniques in the current context of climate change in order to restore *Khaya senegalensis* populations on a large scale. The objective of this study is to assess the adaptation of *Khaya senegalensis* to different environments characterising the areas and ecosystems to be restored via germination and seedling vigour.

2. Material and Method

2.1. Plant Material

The plant material used is composed of seeds harvested from mature fruits of six (6) distinct mother plants, more than 550 m apart in a single stand of *Khaya senegalensis* and seedlings three (3) months old, from seeds harvested from under each mother plant. All seeds were collected from trees in good physiological condition and in good vigour at the experimental forest development station "Diabaté Kamonon" of the Centre National de Recherche Agronomique, in the Korhogo department of Côte d'Ivoire. The characteristics of the seed trees and the corresponding seeds are recorded in **Table 1**.

2.2. Methods

2.2.1. Study Sites

Testing was conducted from December 2018 to July 2019 at three (3) sites (**Table 2**). These sites are distinguished by their microclimate and are distributed in two (2) countries (Côte d'Ivoire "Korhogo: CNRA forest experimental

Table 1. Characteristics of *Khaya senegalensis* seeds used.

Seeders	DBH (cm)	H (m)	Age (year)	GPS coordinates		Number of seeds	Seed mass (g)		
				Longitude	Latitude		Mini	Maxi	Mean
1	36.95	21	32	-5.5033 W	9.5649 N	360	0.1	0.27	0.16 ± 0.04
2	91.72	31.5	43	-5.54454 W	9.56562 N	360	0.06	0.26	0.18 ± 0.05
3	41.56	17.5	27	-5.54824 W	9.56603 N	360	0.06	0.32	0.21 ± 0.07
4	39.17	21.5	28	-5.55008 W	9.56476 N	360	0.03	0.19	0.10 ± 0.04
5	38.54	25	32	-5.5051 W	9.56498 N	360	0.09	0.28	0.17 ± 0.05
6	36.78	17	32	-5.55064 W	9.56345 N	360	0.15	0.46	0.26 ± 0.08

DBH = Diameter to Chest Height in centimeters; **H** = Height in meters; **W** = West; **N** = North; **Mini** = Minimum in gram; **Maxi** = Maximum in gram.

Table 2. Geographical location and characteristics of study sites [2] [39]-[49].

Sites or environments	Coordinates	Vegetation	Climate	Temperature (°C)	Rainfall (mm/year)	Soil type
Korhogo (DeFo)	9°57'080556"N; 5°54'288889"W	Clear forest (wooded and grassy savannah)	Tropical dry	26.6 - 35.7	817 - 1216	Ferruginous (90%) and Ferralitic (10%); superficial gravelly soil, deep gravel with a heavy texture, low in organic matter, highly desaturated.
Daloa (UJLoG)	6°9'09'6363"N; 6°43'8'1157"W	Dense rain forest	Wet tropical (sub-equatorial)	21 - 34	1000 - 1900	Ferralitic, deep, acidic and desaturated in exchangeable bases, rich in organic matter
Montpellier (Greenhouse)	43°64'981"N; 3°8'6842"W	in Greenhouse	in Greenhouse	24 (Nighttime) - 32 (Daytime)	10 cm ³ per week	Mixture of Substrate Soil 1, Neuhaus N2 Bio, Tref Rice CIRAD 2 and extra-silice sand from biot

C° = Degrees Celsius; mm = millimeter; **Substrate 1** = Iron, trace elements, perlite and coconut fibre; **Neuhaus N2 Bio** = vegetable co-composting, blond and black peat; **Tref Rice CIRAD 2** = clay, volcanic sand, perlite no. 2, coconut, Irish white peat and fine blond peat.

station (DeFo) and Daloa: Jean Lorougnon Guédé University (UJLoG)” and in a controlled environment in France “Montpellier: CIRAD ‘Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement’ Greenhouse number 8 of the Lavalette campus”). The localization and characteristics of the study sites are recorded in **Table 2**.

2.2.2. Setting up the Tests

Seed harvesting

Mature fruit was harvested in December 2018, January 2019 and February 2019 from the mother plants with long wooden sticks with forks attached or by stoning the top of the tree with stones. Fruits and seeds were collected from under each tree, then the mature and dry fruits were peeled in order to extract the seeds. The seeds were divided into three (3) seed lots each destined for the sites described above for each seeder. A total of 2160 seeds were selected, including 120 seeds per seeder (6 seeders) for each study site (3: Korhogo, Daloa and Montpellier). So we have 120 seeds × 6 mother plants × 3 test sites = 2160 seeds collected from *Khaya Sénégaleensis*.

Test preparation and apparatus

Korhogo and Daloa Nursery

Polyethylene bags measuring 20 × 10 cm were filled with potting soil and arranged in one (1) block consisting of six (6) sub-blocks (**Figure 1(b)**). Each sub-block was labelled with the seeder’s serial number and geographic coordinates and was intended for seed harvested on and under one (1) seeder. Each sub-block contains 60 soil bags prepared to receive two (2) seeds each. The seeds from each seeder were soaked in water for one day (24 hours) to accelerate germination and then seeded directly to a depth of 1.5 cm (by directing the lower end into the soil and the upper or wide end towards the surface) into the bags at a rate of two (2) seeds per bag. The phytosanitary treatment consisted of treating the seeds with granulated FURADAN to control rodents and the pre-leaves with



(a)



(b)

Figure 1. Image relating to the block system of trials set up in Montpellier greenhouse (a) and Daloa nursery (b).

DECIS to limit lava attacks. Nursery maintenance consisted of daily watering and manual weeding.

Greenhouse of the CIRAD of Montpellier

Polyester pots were filled with a mixture of potting compost of the above-mentioned composition. The pots were arranged in blocks and sub-blocks labelled in metal bins according to the same device used by Korhogo and Daloa (**Figure 1(a)**). The seed semi-piping was the same as at the other two sites. The phytosanitary treatment consisted of biological protection with BIOBEST against greenhouse whiteflies. Maintenance consisted of daily watering (10 cm³ per week).

2.2.3. Data Collection

Germination parameters

The Germination parameters evaluated concern 5 parameters, there are recorded in **Table 3**.

Table 3. Germination parameters evaluated [24] [50]-[55].

Parameters	Definitions
1-Waiting time or latency time	The time elapsed between the half of all seeds and the germination of a first seed
2-Germination delay	The period between the sowing of each seed and the appearance of each seedling
3-Germination speed	The average time after which 50% of the seeds have germinated
4-Spreading time or germination duration	The period between the first seed germination and the last seed germination
5-Germination rate	The quotient of the number of seeds germinated by the total number of seeds sown as a percentage (%)

Development parameters

The parameters evaluated are recorded in **Table 4**.

All morphological (development) parameters were measured using a ruler graduated in centimetres and an electronic caliper in millimetres on a total of 540 seedlings (30 individuals per mother plant and per study site = $30 \times 6 \times 3 = 540$ seedlings).

2.2.4. Data Analysis

The statistical analyses were first performed using one-dimensional descriptive statistics, link analysis (linear regression, correlation and covariance) and multi-dimensional analysis (Principal Component Analysis “PCA”) with XLSTAT 2020 version 7.5. The difference between the germination and morphology parameters was performed using a two-factor multivariate analysis (MANOVA) with the SAS software version 9.4. The Student-Newman-Keuls test at the 5% threshold was used for post hoc comparisons.

3. Results

Germination of *Khaya senegalensis* is hypogeous with a long epicotyl reaching on average 6.33 cm long and 1.2 mm in average diameter at the collar (approximately 15 days after semi and five (5) days after the appearance of the coleoptile and radicle). The preleaves are almost blunt (absent or stunted petiole), opposite each other and generally identical in length and width. The coleoptile and radicle appear on average 10 days after semi. It is after the pre-leaves that phyllotaxis becomes alternate spiral. The seedling gradually develops simple leaves with longer and longer petioles until, at 11 weeks, the appearance of imperipinnate compound leaves which, over time, develop into paripinnate compound leaves.

3.1. Germination and Development Parameters by Study Site or Environment

3.1.1. Environment 1: Korhogo

Germination parameters

Table 4. Development parameters evaluated.

Parameters	Definitions
1-Height of the seedlings (HtPl)	The length between the collar and the apex of the seedling
2-Diameter at the collar of the seedlings (Dcol)	The base thickness of the main stem of the seedling
3-Number of leaves (NbreFe)	The number of leaf organs built or present on the main stem of the seedling
4-Leaf length (LgFe)	The length from the beginning of the petiole to the end of the main vein of the leaf blade of each leaf present on the main stem of the seedling
5-Leaf width (LaFe)	The width of the leaf blade or to the line perpendicular to the main vein in the centre of the leaf blade
6-Length of internodes (LgEntr)	The length connecting two nodes or between two points of successive insertions of organs or leaf scars, from the base to the apex of the seedling

In Korhogo the results showed that germination latency times were 21 days, 22 days, 22 days, 21 days and 21 days respectively for seed trees 1, 2, 3, 4, 5 and 6. Germination delay for seed trees 1, 2, 3, 4, 5 and 6 varied respectively from 21 to 37 days around a mean of 28.09 ± 4.09 days, from 22 to 47 days around a mean of 31.10 ± 6.53 days, from 22 to 49 days around a mean of $34, 03 \pm 6.59$ days, from 21 to 48 days around a mean of 33.51 ± 6.62 days, from 21 to 40 days around a mean of 29.62 ± 4.76 days and from 21 to 48 days around a mean of 34.09 ± 6.07 days. Germination speed were 29 days, 46 days, 38 days, 39 days, 38 days and 35 days respectively for seeders 1, 2, 3, 4, 5 and 6. Germination duration were 16 days, 24 days, 27 days, 27 days, 19 days and 27 days for seeders 1, 2, 3, 4, 5 and 6 respectively. Finally, germination rates of seeds from the Korhogo study site were 93.33%, 58%, 70%, 71.66%, 58.33% and 100% respectively for seed companies 1, 2, 3, 4, 5 and 6.

Development parameters

Comparison of the morphological characteristics of the seedlings from each seed company (**Table 5**) indicates a significant difference between seed company seedlings for each characteristic assessed ($P < 0.05$).

3.1.2. Environment 2: Daloa

Germination parameters

At Daloa, germination waiting times for seed trees 1, 2, 3, 4, 5 and 6 were 10 days, 18 days, 13 days, 15 days, 14 days and 16 days respectively. Germination delay ranged from 10 to 22 days around a mean of 17.13 ± 2.763 days, from 18 to 47 days around a mean of 30.2 ± 6.70 days, from 13 to 38 days around a mean of 26.26 ± 7.04 days, from 15 to 44 days around a mean of 25.1 ± 6.797 days, from 14 to 30 days around a mean of 19.5 ± 3.097 days and from 16 to 24 days around a mean of 20.3 ± 2.423 days for seeders 1, 2, 3, 4, 5 and 6 respectively. Germination speeds were 22 days, 47 days, 38 days, 38 days, 44 days, 30 days and 24 days for seeders 1, 2, 3, 4, 5 and 6 respectively. Germination duration were 12 days, 29

Table 5. Influence of seed companies on seedling development characteristics in Korhogo.

Seeders	HtPl (cm)	Dcol (mm)	NbrFe	LgFe (cm)	LaFe (cm)	LgEntr (cm)
Seeder-1	17.25 ± 2.62 b	2.01 ± 0.51 ab	5.86 ± 0.79 b	9.56 ± 0.51 ab	2.9 ± 0.31 b	1.98 ± 0.61 b
Seeder-2	17.78 ± 1.56 b	2.73 ± 0.47 a	5.85 ± 0.85 b	10.81 ± 0.42 ab	3.8 ± 0.18 a	2.63 ± 0.56 ab
Seeder-3	18.68 ± 2.42 ab	2.69 ± 0.53 a	6.57 ± 0.88 ab	13.2 ± 0.66 a	3.82 ± 0.34 a	3.52 ± 0.71 a
Seeder-4	16.96 ± 2.87 b	1.41 ± 0.49 b	5.95 ± 0.72 b	11.21 ± 0.72 ab	3.74 ± 0.17 a	3.05 ± 0.48 ab
Seeder-5	17.85 ± 3.05 ab	2.85 ± 0.56 a	6.8 ± 0.83 a	8.7 ± 0.43 b	4.02 ± 0.35 a	1.58 ± 0.63 b
Seeder-6	19.62 ± 2.44 a	2.42 ± 0.68 a	6.95 ± 0.82 a	12.2 ± 0.81 ab	3.01 ± 0.13 b	4.13 ± 0.57 a
Pr > F	0.0001	0.0031	0.047	0.0021	0.011	0.0382

For each character, values with the same letters are not statistically different at the 5% threshold.

days, 25 days, 25 days, 29 days, 16 days and 8 days respectively for seeders 1, 2, 3, 4, 5 and 6. Seed germination rates were 87%, 70%, 80%, 63.33%, 65% and 95% for seed companies 1, 2, 3, 4, 5 and 6 respectively.

Development parameters

At Daloa, comparison of seedling development characteristics (**Table 6**) indicates statistically significant variability among seedlings of seed companies for all characteristics assessed at Daloa ($P < 0.05$).

3.1.3. Environment 3: Montpellier (Greenhouse)

Germination parameters

In the CIRAD greenhouse at the Lavalette campus (controlled environment), results showed that germination latencies were 12 days, 12 days, 13 days, 16 days, 10 days and 13 days respectively for seeders 1, 2, 3, 4, 5 and 6. Germination delay for seed from seeders 1, 2, 3, 4, 5 and 6 varied respectively from 12 to 34 days around a mean of 16.25 ± 2.63 days, from 12 to 21 days around a mean of 16.315 ± 2.56 days, from 13 to 20 days around a mean of 16.238 ± 2.278 days, from 16 to 25 days around a mean of 19.655 ± 3.066 days, from 10 to 20 days around a mean of 16.526 ± 3.24 days, and from 13 to 21 days around a mean of 16.82 ± 2.52 days. Germination speeds were 34 days, 17 days, 14 days, 19 days, 16 days and 18 days respectively for seeders 1, 2, 3, 4, 5 and 6. Germination durations were 22 days, 9 days, 7 days, 7 days, 9 days, 10 days and 8 days for seeders 1, 2, 3, 4, 5 and 6 respectively. Germination rates were 50%, 88.33%, 100%, 96.66%, 98.33% and 100% for seeders 1, 2, 3, 4, 5 and 6 respectively.

Development parameters

Comparison of the morphological characteristics of seedlings from each seeder (**Table 7**) shows that the seedlings are all different from one seeder to another for each characteristic assessed at Montpellier ($P < 0.05$).

3.2. Synthesis of Germination and Development

3.2.1. Germination Parameters

Figure 2 provides an overview of all germination parameters observed at the

Table 6. Influence of seeders on seedling development characteristics in Daloa.

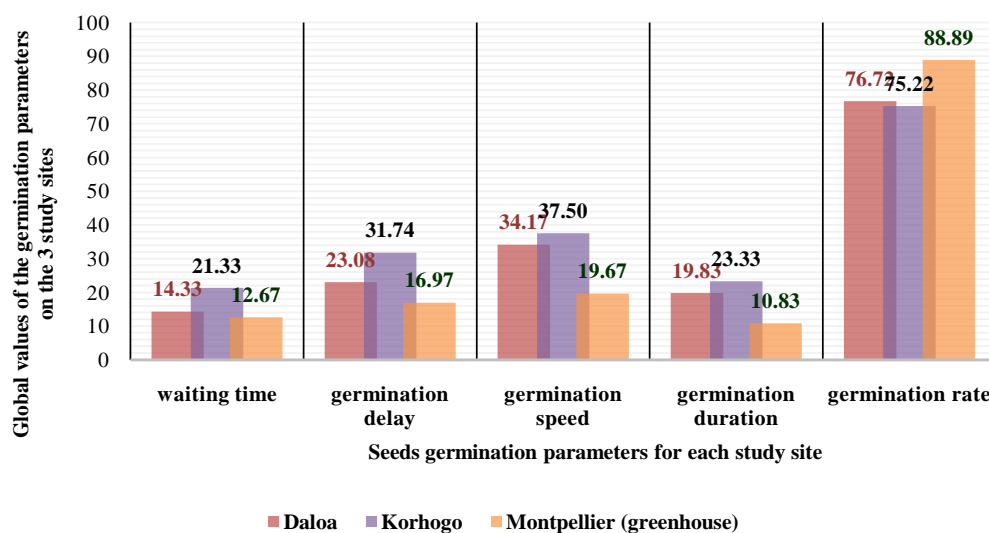
Seeders	HtPl (cm)	Dcol (mm)	NbrFe	LgFe (cm)	LaFe (cm)	LgEntr (cm)
Seeder-1	23.5 ± 2.11 ab	3.01 ± 0.33 ab	7.86 ± 0.64 b	10.36 ± 0.28 b	3.01 ± 0.41 b	3.56 ± 0.62 ab
Seeder-2	21.48 ± 3.36 b	3.73 ± 0.41 a	7.85 ± 0.57 b	11.08 ± 0.18 b	3.8 ± 0.12 ab	3.41 ± 0.31 ab
Seeder-3	26.68 ± 3.51 ab	3.69 ± 0.52 a	8.57 ± 0.42 ab	14.31 ± 0.41 a	4.32 ± 0.31 a	4.05 ± 0.41 a
Seeder-4	27.56 ± 2.17 a	2.41 ± 0.21 b	7.95 ± 0.47 b	9 ± 0.37 b	3.42 ± 0.52 ab	3.02 ± 0.19 ab
Seeder-5	24.85 ± 3.08 ab	3.85 ± 0.36 a	8.8 ± 0.35 a	10.6 ± 0.24 b	3.61 ± 0.27 ab	2.94 ± 0.34 ab
Seeder-6	25.63 ± 3.01 ab	3.42 ± 0.18 a	8.95 ± 0.82 a	11.8 ± 0.29 b	3.97 ± 0.23 ab	2.32 ± 0.26 b
Pr > F	0.0071	0.0111	0.0051	0.001	0.0083	0.00231

For each character, values with the same letters are not statistically different at the 5% threshold.

Table 7. Influence of seeders on the development characteristics of seedlings in Montpellier greenhouse.

Seeders	HtPl (cm)	Dcol (mm)	NbrFe	LgFe (cm)	LaFe (cm)	LgEntr (cm)
Seeder-1	27.75 ± 1.25 ab	4.01 ± 0.14 ab	8.86 ± 0.71 b	10.33 ± 0.45 ab	3.6 ± 0.51 b	3.6 ± 0.42 b
Seeder-2	27.98 ± 2.33 ab	4.73 ± 0.43 a	8.85 ± 0.34 b	11.46 ± 0.42 ab	4.3 ± 0.25 a	4.23 ± 0.31 a
Seeder-3	28.68 ± 1.61 ab	4.69 ± 0.61 a	9.57 ± 0.19 ab	12.36 ± 0.28 a	4.56 ± 0.17 a	3.36 ± 0.11 b
Seeder-4	26.36 ± 1.17 b	3.41 ± 0.23 b	8.95 ± 0.18 b	9.6 ± 0.29 b	3.43 ± 0.19 b	3.58 ± 0.17 b
Seeder-5	27.75 ± 3.12 ab	4.85 ± 0.21 a	9.8 ± 0.15 a	9.5 ± 0.14 b	3.43 ± 0.27 b	3.89 ± 0.19 ab
Seeder-6	29.72 ± 1.45 a	4.42 ± 0.51 a	9.95 ± 0.27 a	10.63 ± 0.47 ab	3.96 ± 0.36 ab	4.52 ± 0.27 a
Pr > F	0.046	0.0114	0.0331	0.0001	0.021	0.001

For each character, values with the same letters are not statistically different at the 5% threshold.

**Figure 2.** Comparison of each germination parameters for all 3 study sites.

three study sites. This figure indicates that overall, only the germination rate was higher in Montpellier glasshouse and that Korhogo recorded the highest values for the four (4) other germination parameters (waiting time, germination delay, germination speed and germination duration) observed.

Influence of seeders

The analysis of variance (**Table 8**) shows overall that the seed company does not influence seed germination parameters because all observed variables are statistically identical from one seed company to another ($p > 0.05$) for all three sites.

Influence of environments

The analysis of variance (**Table 9**) indicates a significant difference between study sites for the parameters waiting time, germination delay, germination speed and germination spread ($P < 0.05$). However, it indicates that the germination rate is statistically the same in all study sites ($P > 0.05$).

Table 10 shows in general for all study sites a strong positive correlation between

Table 8. Influence of seeders on germination parameters of *Khaya senegalensis*.

Seeders	waiting time	germination delay	germination speed	germination duration	germination rate
Seeder-1	14.33 ± 3.38 a	20.49 ± 3.80 a	28.33 ± 3.48 a	16.66 ± 2.90 a	76.77 ± 13.51 a
Seeder-2	17.33 ± 2.90 a	25.87 ± 4.78 a	36.66 ± 9.83 a	20.66 ± 6.01 a	72.11 ± 8.81 a
Seeder-3	16.00 ± 3.00 a	25.50 ± 5.15 a	30.00 ± 8.00 a	19.66 ± 6.36 a	83.33 ± 8.82 a
Seeder-4	17.33 ± 1.85 a	26.09 ± 4.03 a	34.00 ± 7.64 a	21.66 ± 6.36 a	77.21 ± 10.01 a
Seeder-5	15.00 ± 3.21 a	21.88 ± 3.96 a	28.00 ± 6.43 a	15.00 ± 2.64 a	73.88 ± 12.37 a
Seeder-6	16.66 ± 2.33 a	23.74 ± 5.27 a	25.66 ± 4.97 a	14.33 ± 6.33 a	98.33 ± 1.66 a
Pr > F	0.9598	0.9255	0.8775	0.8848	0.4908

For each character, values with the same letters are not statistically different at the 5% threshold.

Table 9. Influence of environment on germination variable of *Khaya senegalensis*.

study site or environments	waiting time	germination delay	germination speed	germination duration	germination rate
<i>Korhogo</i>	21.33 ± 0.21 a	31.74 ± 1.03 a	37.50 ± 2.26 a	23.33 ± 1.94 a	75.22 ± 7.22 a
<i>Daloa</i>	14.33 ± 1.16 b	23.08 ± 2.07 b	34.16 ± 4.26 a	19.83 ± 3.70 a	76.72 ± 5.20 a
<i>Montpellier (greenhouse)</i>	12.66 ± 0.80 b	16.96 ± 0.54 c	19.66 ± 2.95 b	10.83 ± 2.27 b	88.88 ± 7.97 a
Pr > F	0.0001	0.0001	0.0035	0.016	0.3343

For each character, values with the same letters are not statistically different at the 5% threshold.

Table 10. Correlation matrix (Pearson) of germination parameters for all study sites.

Variables	waiting time	germination delay	germination speed	germination duration	germination rate
waiting time	1				
germination delay	0.899	1			
germination speed	0.622	0.787	1		
germination duration	0.554	0.797	0.935	1	
germination rate	-0.269	-0.325	-0.747	-0.634	1

Values in bold are different from 0 at significance level $\alpha = 0.05$.

germination speed and germination duration and between waiting time and germination delay. It indicates a positive correlation between waiting time and germination speed, germination delay and germination speed and germination duration. However the matrix shows a strong negative correlation between germination rate and germination speed then germination duration.

3.2.2. Development Parameters

Influence of seeders

The analysis of variance of the morphological characteristics of the seedlings from each seeder (Table 11) indicates a statistical similarity between the variables Height (HtPl), diameter at collar (Dcol), number of leaves (NbreFe) and internode lengths (LgEntr) of the seedlings ($P > 0.05$). However, the length (LgFe) and width (LaFe) of the leaves of the seedlings are all different between seedlings ($P < 0.05$).

Influence of environments

Overall, the results in Table 12 show that morphology parameters behave statistically differently from one environment to another ($P < 0.05$), except for leaf length and width, which are all the same regardless of the study site ($P < 0.05$).

Table 11. Influence of seeders on morphological parameters of *Khaya senegalensis* seedlings.

Seeders	HtPl (cm)	Dcol (mm)	NbreFe	LgFe (cm)	LaFe (cm)	LgEntr (cm)
Seeder-1	22.83 ± 3.04 a	3.01 ± 0.57 a	7.52 ± 0.88 a	10.08 ± 0.26 b	3.17 ± 0.21 b	3.05 ± 0.53 a
Seeder-2	22.41 ± 2.98 a	3.73 ± 0.57 a	7.51 ± 0.88 a	11.12 ± 0.18 b	3.96 ± 0.17 ab	3.42 ± 0.46 a
Seeder-3	24.68 ± 3.05 a	3.65 ± 0.58 a	8.23 ± 0.88 a	13.29 ± 0.56 a	4.23 ± 0.22 a	3.64 ± 0.21 a
Seeder-4	23.62 ± 3.35 a	2.41 ± 0.57 a	7.61 ± 0.88 a	9.94 ± 0.66 b	3.53 ± 0.11 ab	3.22 ± 0.18 a
Seeder-5	23.48 ± 2.94 a	3.85 ± 0.57 a	8.47 ± 0.88 a	9.60 ± 0.55 b	3.69 ± 0.17 ab	2.80 ± 0.67 a
Seeder-6	24.99 ± 2.93 a	3.42 ± 0.57 a	8.62 ± 0.88 a	11.54 ± 0.47 b	3.04 ± 0.31 ab	3.66 ± 0.68 a
Pr > F	0.9882	0.5071	0.8892	0.0014	0.0441	0.7933

HtPl: Height of the seedlings; **Dcol:** Diameter at the collar of the seedlings; **NbreFe:** Number of leaves; **LgFe:** Leaf length; **LaFe:** Leaf width; **LgEntr:** Length of internodes; **cm:** centimetres; **mm:** millimetres. For each character, values with the same letters are not statistically different at the 5% threshold.

Table 12. Influence of environments on morphological parameters of *Khaya senegalensis*.

Study site or Environments	HtPl (cm)	Dcol (mm)	NbreFe	LgFe (cm)	LaFe (cm)	LgEntr (cm)
Daloa	24.95 ± 0.90 b	3.35 ± 0.22 b	8.33 ± 0.20 b	11.19 ± 0.73 a	3.68 ± 0.18 a	3.22 ± 0.24 ab
Korhogo	18.02 ± 0.39 c	2.35 ± 0.22 c	6.33 ± 0.20 c	10.94 ± 0.67 a	3.54 ± 0.19 a	2.81 ± 0.38 b
Montpellier (greenhouse)	28.04 ± 0.45 a	4.35 ± 0.22 a	9.33 ± 0.21 a	10.64 ± 0.45 a	3.88 ± 0.19 a	3.86 ± 0.18 a
Pr > F	0.0001	0.0001	0.0001	0.8310	0.4829	0.0481

HtPl: Height of the seedlings; **Dcol:** Diameter at the collar of the seedlings; **NbreFe:** Number of leaves; **LgFe:** Leaf length; **LaFe:** Leaf width; **LgEntr:** Length of internodes; **cm:** centimetres; **mm:** millimetres. For each character, values with the same letters are not statistically different at the 5% threshold.

The covariance (Table 13) indicates in general for all seedlings from each seedling distributed over the 3 study sites, a strong correlation between height and diameter at the collar of the seedlings, then between height and number of leaves of the seedlings. This matrix also indicates a strong positive correlation between the crown diameter and the number of leaves of the seedlings.

Figure 3 shows the projection of environments and morphological parameters for all seedlings in PCA 1 - 2 (biplot). The analysis of the matrix of factor weights allowed the extraction of two components that explain 100% of the variability and are therefore very relevant in explaining the total variation between the morphological characteristics of the seedlings and the environments. Plan 1 - 2 is characterized by eigenvalues of 86.87% for axis F1 and 13.13% for axis F2. The different descriptors contributing to the formation of the first (F1) and second component (F2) show two groups. The first group consists of Montpellier (greenhouse) by higher heights, collar diameters, leaf counts, leaf widths and

Table 13. Correlation matrix (Pearson) of morphological characteristics of seedlings for all study sites.

Variables	HtPl (cm)	Dcol (mm)	NbrFe	LgFe (cm)	LaFe (cm)	LgEntr (cm)
HtPl (cm)	1					
Dcol (mm)	0.796	1				
NbrFe	0.946	0.876	1			
LgFe (cm)	0.032	0.106	0.033	1		
LaFe (cm)	0.336	0.496	0.351	0.467	1	
LgEntr (cm)	0.561	0.498	0.526	0.417	0.111	1

HtPl: Height of the seedlings; **Dcol:** Diameter at the collar of the seedlings; **NbreFe:** Number of leaves; **LgFe:** Leaf length; **LaFe:** Leaf width; **LgEntr:** Length of internodes; **cm:** centimetres; **mm:** millimetres. Values in bold are different from 0 at significance level alpha = 0.05.

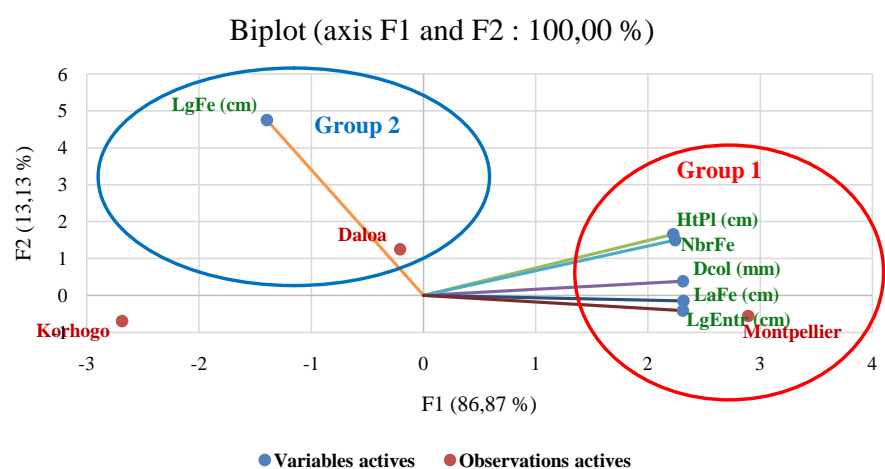


Figure 3. Projection of localities and morphological parameters observed in PCA Plan 1 - 2 as a function of axis type. **HtPl:** Height of the seedlings; **Dcol:** Diameter at the collar of the seedlings; **NbreFe:** Number of leaves; **LgFe:** Leaf length; **LaFe:** Leaf width; **LgEntr:** Length of internodes; **cm:** centimetres; **mm:** millimetres.

internode lengths of seedlings than Daloa and Korhogo. The second group consists of Daloa, which is characterized by higher seedling leaf widths.

4. Discussion

4.1. Germination Parameters

The results showed that the germination of *Khaya senegalensis* is hypogeous with almost stalkless pre-leaves. The seedling emits over time leaves with longer and longer petioles until it develops a compound leaf. Indeed at the very young stage (one week after germination), the plant still depends on the starch contained in the seed. The reserve contained in the embryo is used to emit opposite leaves without petiole at the beginning then some leaves (2 to 5 leaves) alternate spiral with increasingly long petioles. The seedling becomes independent following the disappearance of the embryo and the appearance of leaves composed imperipentate then later composed paripentate (authentic organogenesis of the species). The seedling expresses its normal development only after reaching the compound leaf stage. In fact, the cost of operating and building its normal structure is high and therefore requires continuous adaptation.

In Korhogo, the minimum latency was 21 days and was observed in seed trees 1, 4, 5 and 6; in Daloa the minimum latency was 10 days (seed tree 1), the maximum latency was 18 days (seed tree 2) and in a controlled environment (greenhouse) the minimum latency was also 10 days (seed tree 5) with a maximum of 16 days (seed tree 4). This minimum germination delay potential is not related to the type of seed tree since it differs from one seed tree to another for each study site. However, this difference in latency time between study sites could be related to soil richness and local climate type. Indeed in Korhogo the seeds were sown in a ferruginous soil subjected to a dry tropical climate unlike Daloa (ferralitic soil and humid tropical climate) and in Greenhouse (mixture of substrate rich in mineral elements with a very stable climate without fluctuation). However, some authors in Niger and in Burkina Faso obtained lower latency times (5 to 7 days) on the same soil type as Korhogo, but with 4 species of Combretaceae (*Combretum glutinosum*, *Combretum micranthum*, *Combretum nigrians* and *Guiera senegalensis*) [24] [56].

The results showed that the average minimum germination delay of seeds in Korhogo was 28.09 days (seeder 1), 17.13 days (seeder 1) in Daloa and 16.23 days (seeder 3) in a controlled environment just before seeder 1 (16.25 days). Overall, seeds sown in greenhouses have a reduced germination delay, unlike seeds sown in Korhogo. This is explained by the stable and constant temperature throughout the experiment (28°C to 32°C day and 22°C to 24°C night). The delays are longer in Korhogo because of the unstable and deregulated climate subject to temperature fluctuation observed in recent years [38]. Indeed a very high heat without regular water supply limits the delay and even damages the seeds. Authors have found the same case for germination of *Faidherbia albida* [57]. Indeed, several studies have shown the effect of the climate or climatic zone of

origin, soil, mother trees and soil poverty on germination, growth and morphological development of seedlings [58]-[66]. Seedlings 1 seems to be characterized by a relatively short seedling delay regardless of the study site, probably due to its thin-shelled seeds facilitating emergence from the seed coat. Indeed, a rigid fruit shell would limit the capacity for rapid germination through pericarpic dormancy [67]. Studies have found pericarpal dormancy in *Pterocarpus angolensis* and *Pterocarpus santalinus* respectively [68] [69]. The minimum germination speed in Korhogo was 29 days (seeder 1), 22 days (seeder 1) in Daloa and 14 days (seeder 3) in Montpellier. Half of the seeds sown germinated faster in Daloa and Montpellier because of the relatively high and humid temperatures and the richness of the soil. Indeed, while light allows plants to develop (elaboration of structure), heat favours growth (dry matter gain) and thus rapid seed dormancy [70] [71]. The minimum period between the first germination and the last germination was 16 days in Korhogo (seeder 1), 8 days (seeder 6) in Daloa and 7 days (seeder 3) in a controlled environment. These germination times are short despite the fact that the seeds have not been treated beforehand as was the case with *Pterocarpus erinaceus* [54], *Parkia biglobosa* [72], *Pistacia vera* [73], *Albizia lebbek*, *Albizia procera*, *Peltophorum pterocarpum* and *Acacia auriculiformis* and *Leucaena leucocephala* [74]. As for the germination rate, it was higher with seeds from seed tree 6 (100%) and lower with seeds from seed tree 2 (58%) in Korhogo; in Daloa this rate was high for seed tree 6 (95%) and lower for seed tree 4 (63.33%) and in the greenhouse it was higher for seed trees 3 (100%) and 6 (100%) and lower for seed tree 1 (50%). Seeder 6 has a higher rate than the other 5 seeders across all study sites because of its visibly larger, uniform and heavier seeds. The seeds of the other seed companies have smaller and more varied seed sizes (mass, length, width and thickness). A germination test calibrating seed size is necessary to confirm this fact and to guide the choice of seed that can limit germination failure rates or even the choice of marketable seed. Overall, Korhogo environment recorded longer waiting times, delays and germination duration with slower germination speed than other study sites. This is related to the poor soil and climate of the area. High germination rates were recorded in the Montpellier greenhouse and it should be noted that 100% germination rates were obtained in Korhogo and Montpellier. In fact this species is native to the Guinean-Sudanian and Sudano-Sahelian savannah zone [33] [34] [37] [38] [75] and the climate of Korhogo and the greenhouse have the same environmental conditions as this zone (Guinean-Sudanian and Sudano-Sahelian). Authors had obtained similar germination rates in the same area with another species (*Parkia biglobosa*) originating from the same climate [76]. The analysis of variance showed that all seeds from the seed growers had almost the same germination behaviour from one site to another. This is clearly explained by the similarity of the intra variability in seed size from one seed company to another. However, Student's test indicates that each site significantly influences all the observed parameters except germination rate, which statistically presents the same distributions from one site to another. This is similarly due to the environment (climates

and soil type) to which the seeds are subjected for germination [58]-[66]. The correlation matrix generally indicates a strong positive relationship between latency and germination delay ($r = 0.899$) and germination speed ($r = 0.622$); meaning that the longer it takes for the first germination to occur, the slower the germination speed and the longer the germination delay. It also indicates a strong positive correlation between germination delay and germination speed ($r = 0.787$) then germination duration ($r = 0.797$); this indicates that the shorter the germination delay, the faster the germination speed and the shorter the germination period. This correlation matrix also indicates a strong positive correlation between germination speed and germination durée ($r = 0.935$), which means that the faster the germination speed, the shorter the germination spread. However, the same matrix shows a negative correlation between germination rate and germination speed ($r = -0.747$) and then germination duration ($r = -0.634$). This highlights the fact that the higher the germination rate, the slower the speed and the lower the spread of germination.

4.2. Development Parameters

The analysis of variance indicated a significant difference between study sites for the majority of morphological characteristics observed in the seedlings ($P < 0.05$). At Korhogo the mean height of the seedlings was 18.02 cm and the mean diameter at the collar of the seedlings was 2.35 mm. These values are lower than those obtained in the same environment (climate and soil type) in Niger with *Guiera senegalensis* (mean height 25.8 cm and mean diameter 3.22 mm) after 100 days [24] and in Côte d'Ivoire (Haut Bandama Reserve) in 3 months with *Pterocapus erinaceus* (mean height 40 cm and mean diameter 4.35 mm) [54]. In detail, the student test showed that morphological characters of seedlings differed from one locality to another except for leaf length and width ($P > 0.05$). However, when considering seedlings from one seeder to another for all 3 sites combined, this test indicated that leaf length and width differed statistically ($P < 0.05$). Indeed, seeds from each seedling were separated and repeated at each site, hence the no influence of the environment effect on certain development parameters; however, seeds have different characteristics from one seedling to another, which can lead to variations in seedling morphology from one seedling to another. In fact, depending on the environmental conditions of the environment (temperature, sunshine, hygrometry, soil, etc.), seedlings vary the morphology (length and width) of their leaves in order to adapt and better capture sunlight for efficient photosynthetic activation. Studies [58]-[66] have already shown the effect of climate, soil, mother trees and soil poverty on the germination, growth and morphological development of several plant species. The pearson matrix showed overall a strong positive correlation between seedling height and crown diameter ($r = 0.796$) and leaf count. This means that an increase in height leads to an increase in the diameter and number of leaves of the seedlings. It also indicates a strong correlation between crown diameter and leaf count ($r = 0.876$). This means that as the crown diameter increases, the number

of leaves on the seedlings increases. The principal component analysis showed that the Montpellier glasshouse is related to the highest morphological characteristics. Indeed, a stable and controlled environment increases the height, diameter, number of leaves, length of leaves and internodes of the seedlings. Since the seedlings are in optimal conditions, organogenesis takes place without limiting factors.

5. Conclusion

This study carried out on germination and seedling development of *Khaya senegalensis* in different environments showed that the environment (climate and soil type) influences germination and seedling development in *Khaya senegalensis* ($P < 0.05$). However, the characteristics of the mother trees (seed source) sampled did not have a significant effect on germination and seedling development ($P > 0.05$). It appears from this study that the stable and controlled environment (greenhouse) and the environment characterized by a humid tropical climate are more favourable for artificial regeneration of stands in *Khaya senegalensis*. This savannah species is native to the arid zones of Africa, but this study highlighted its adaptive potential to changing and different climates. We conclude from this study that it is important to take into account the climatic characteristics of the environments to be restored. This study could be extended to other species for the sustainable management of disturbed areas and ecosystems.

Statement of Credit Author's Contribution

Beda Innocent Adji: Conceptualization, Methodology, Supervision, Software, Formal Analysis, Resources, Data Retention. **Sélastique Doffou Akaffou:** Project Administration, Methodology, Resources, Data Retention, Supervision, Writing original project, Research and acquisition of funding. **Yao Patrice Houphouet:** Methodology. **Kouadio Henri Kouassi:** Project administration, Writing original project, Research and acquisition of funding. **Jerôme Duminil:** Project administration, Resources, Writing original project, Research and acquisition of financing. **Sylvie Sabatier:** Project Administration, Methodology, Resources, Data Retention, Supervision, Writing original project, Research and acquisition of funding.

Acknowledgements

This study was financed by the MESRS (Ministry of Higher Education and Scientific Research) of Côte d'Ivoire, the AFD (Agence Française de Développement) and the IRD (Institut de Recherche Pour le Développement) within the framework of PRESeD-CI 2 (Renewed Partnership for Research for Development in Côte d'Ivoire) and C2D (Debt Reduction Contract) of the AMRUGE-CI project (Support for the Modernization and Reform of Universities and Grandes Ecoles of Côte d'Ivoire). The authors are very grateful to the CIRAD (Centre de

Coopération International de Recherche Agronomique pour le Développement) for providing a greenhouse (controlled environment) and the technical equipment necessary for the conduct of this study.

Conflicts of Interest

All the authors agree to the publication of these results and declare that they have no conflict of interest.

References

- [1] Houndonougbo, J.S.H., Kassa, B., Mensah, S., Salako, V.K., Glèlè, K.R. and Assogbadjo, A.E. (2020) A Global Systematic Review on Conservation and Domestication of *Parkia biglobosa* (Jacq.) R. Br. ex G. Don, an Indigenous Fruit Tree Species in Sub-Sahara African Traditional Parklands: Current Knowledge and Future Directions. *Genetic Resources and Crop Evolution*, **67**, 1051-1066. <https://doi.org/10.1007/s10722-020-00892-w>
- [2] Bruno, H., Anatole, K.N., N'klo, O., Assandé, A., Fabrice, B., Brahima, C., Doua-Bi, Y., Koffi, Y., Koffi, K.J.C., Konaté, I., Tiéoulé, F., Wourro, F., Zo-Bi, I.C. and Louppe, D. (2020) The Long-Term Performance of 35 Tree Species of Sudanian West Africa in Pure and Mixed Plantings. *Forest Ecology and Management*, **468**, 118-171. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118171>
- [3] Dumenu, W.K. (2019) Assessing the Impact of Felling/Export Ban and CITES Designation on Exploitation of African Rosewood (*Pterocarpus erinaceus*). *Biological Conservation*, **236**, 124-133. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.05.044>
- [4] Segla, N.K., Rabiou, H., Adjonou, K., Moussa, B.M., Saley, K., Radji, R.A., Kokutse, A.D., Bationo, A.B., Mahamane, A. and Kokou, K. (2016) Population Structure and Minimum Felling Diameter of *Pterocarpus erinaceus* Poir in Arid and Semi-Arid Climate Zones of West Africa. *South African Journal of Botany*, **103**, 17-24. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2015.09.005>
- [5] FAO (2014) State of the World's Forests (SOFO). Enhancing the Socioeconomic Benefits from Forests, Putting People at the Centre. 133.
- [6] Mbowa, C., Chhinb, S., Samboua, B. and Skolec, D. (2013) Potential of Dendrochronology to Assess Annual Rates of Biomass Productivity in Savanna Trees of West Africa. *Dendrochronologia*, **31**, 41-51. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2012.06.001>
- [7] Choat, B., Jansen, S., Brodribb, T.J., Cochard, H., Delzon, S., Bhaskar, R., Bucci, S.J., Field, T.S., Gleason, S.M., Hacke, U.G., Jacobsen, A.L., Lens, F., Maherali, H., Martinez-Vilalta, J., Mayr, S., Mencuccini, M., Mitchell, P.J., Nardini, A., Pittermann, J., Pratt, R.B., Sperry, J.S., Westoby, M., Wright, I.J. and Zanne, A.E. (2012) Global Convergence in the Vulnerability of Forests to Drought. *Nature*, **491**, 752-755. <https://doi.org/10.1038/nature11688>
- [8] IPGRI (1999) Vers une approche régionale des ressources génétiques forestières en Afrique sub-saharienne. Recensement Général de la Population et de l'Habitat Sahélien. Actes du premier atelier régional de formation sur la conservation et l'utilisation durable des ressources génétiques forestières en Afrique de l'ouest, Afrique forestière. CIRAD/GILLSS/CORAF/CTA/DESC/FAO/UNEP/UNSO, Ouagadougou, Burkina Faso, 229.
- [9] Kamari, P., Otaghvaria, A.M., Govindaparyari, H., Bahuguna, M. and Uniyal, P. (2009) Some Ethno-Medically Important of India. *International Medical Aromatic of Plant*, **1**, 18-22.

- [10] Piba, C., Koulibaly, D., Goetze, D., Porembski, S. and Traoré, D. (2011) Diversité et importance sociale des espèces médicinales conservées dans les agrosystèmes ca-coyers au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Annales de Botanique de l'Afrique de l'Ouest*, **7**, 80-96.
- [11] Kumar, P. and Lalramnghinglova, H. (2011) India with Special Reference to an Indo-Burma Hotspot Region. *Ethnobotany Research & Applications*, **9**, 379-420. <https://doi.org/10.17348/era.9.0.379-420>
- [12] De Wasseige, C., Marcken, P., Bayol, N., Hiol, H.F., Mayaux, P. and Desclée, B. (2012) Les forêts du bassin du Congo. État des forêts 2010. Office des publications de l'Union européenne, Luxembourg, 276 p.
- [13] Sosef, M., Dauby, G., Blach-Overgaard, A., van der Burgt, X., Catarino, L. and Damen, T. (2017) Exploring the Floristic Diversity of Tropical Africa. *BMC Biology*, **15**, 15. <https://doi.org/10.1186/s12915-017-0356-8>
- [14] Kossi, N.S., Kossi, A., Abdou, R.R., Adzo, D.K., Kouami, K., Rabiou, H., Pouwisawe, K., Babou, A.B. and Ali, M. (2015) Importance Socio-Economique de *Pterocarpus erinaceus* Poir au togo. *European Scientific Journal*, **11**, 199-217.
- [15] Marie-louise, A.A., Sincère, K., Delphine, D.N. and Blaise, M.M. (2019) Structure des peuplements et potentiel de domestication de *Parkia biglobosa* dans la région de Tandjilé-Ouest (Tchad). *International Journal of Biological and Chemical Science*, **13**, 219-236. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v13i1.19>
- [16] Sinsin, B., Eyog, M.O., Assogbadjo, A.E., Gaoue, G.O. and Siandouwirou, T. (2004) Dendrometric Characteristics as Indicators of Pressure on *Azelia africana* Sm. Dynamic Changes in Trees Found in Different Climatic Zones of Benin. *Biodiversity and Conservation*, **13**, 1555-1570. <https://doi.org/10.1023/B:BIOC.0000021328.56517.46>
- [17] Glèlè, K.R., Assogbadjo, A.E., Sinsin, B. and Pelz, D. (2009) Structure spatiale et régénération naturelle de *Pterocarpus erinaceus* Poir en zone Soudanienne au Benin. *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologies*, **13**, 199-212.
- [18] Maréchal, C., Cawoy, V., Coquyt, C., Dauby, G., Dessenin, S., Douglas-Hamilton, I., Dupain, J., Fischer, E., Obang, D.F., Groom, Q., Henshel, P., Jeffery, K.J., Korte, L., Lewis, S.L., Lubunu, S., Maisels, F., Melletti, M., Ngouffo, R., Ntore, S., Palla, F., Scholte, P., Sonke, B., Stevart, T., Stoffelen, P., Van Den Broeck, D., Walters, G. and Williamson, E.A. (2014) Conservation et Gestion de la biodiversité. In Etat des Forêts 2013. 67-96.
- [19] Touré, Y. (2001) Etude des potentialités agro forestières de la multiplication et des usages de *Pterocarpus erinaceus* Poir en zone soudanienne du Burkina Faso. Mémoire IDR, 89 p.
- [20] Eba', A.R., Lescuyer, G., Gouhouo, P.J. and Moulende, F.T. (2013) Etude de l'importance économique et sociale du secteur forestier et faunique dans les Etats d'Afrique Centrale, Cas du Cameroun. Rapport d'étude CIFOR, 316 p.
- [21] Maazou, R., Rabiou, H., Issiaka, Y., Abdou, L., Saidou, I.S. and Mahamane, A. (2017) Influence de l'occupation des terres sur la dynamique des communautés végétales en zone Sahélienne, cas de la commune rurale de Dantchandou (Niger). *International Journal of Biological and Chemical Science*, **11**, 79-92. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v11i1.7>
- [22] Drabo, I., Ilboudo, F., Tallet, B., Quesnel, A. and Marchal, J.Y. (2013) Dynamique des populations, disponibilités en terres et adaptation des régimes fonciers, le Burkina Faso, une étude de cas. CICRED, Paris, FAO, Rome, 114 p.
- [23] Leroy, M., Derroire, G., Vendé, J. and Leménager, T. (2015) La gestion durable des

- forêts tropicales. De l'analyse critique du concept à l'évaluation environnementale des dispositifs de gestion. *Bois et Forêts des Tropiques*, 86-87.
- [24] Amani, M.M., Inoussa, I., Dan Guimbo, A., Mahamane, M., Saadou, A. and Lykke, A.M. (2015) Germination et croissance de quatre espèces de Combretaceae en pépinière. *Tropicultura*, **33**, 135-145.
- [25] Akaffou, S.D., Kouamé, K.A., Gore, B.B.N., Abessika, Y.G., Kouassi, K.H., Hamon, P., Sabatier, S. and Duminil, J. (2019) Effect of the Seeds Provenance and Treatment on the Germination Rate and Plants Growth of Four Forest Trees Species of Côte d'Ivoire. *Journal of Forestry Research*, **73**, 87-90. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01064-y>
- [26] Nikiema, A. and Pasternak, D. (2008) *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. PROTA (Plant Resources of Tropical Africa/Ressources végétales de l'Afrique tropicale). 43-56.
- [27] Belem, B., Olsen, C.S., Theilade, I., Bellefontaine, R., Guniko, S., Lykke, A.M., Diallo, A. and Boussim, J.I. (2008) Identification des arbres hors forêt préférés des populations du Sanmatenga (Burkina Faso). *Bois et Forêts des Tropiques*, **298**, 53-64.
- [28] Obafèmi, A.F.L., Yacinthe, A., Abiodoun, P.O., Erick, V.B.A. and Anatole, L. (2015) Etude bibliographique de trois plantes antidiabétiques de la flore béninoise, *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss (Meliaceae), *Momordica charantia* Linn (Cucurbitaceae) et *Moringa oleifera* Lam (Moringaceae). *International Journal of Biological Sciences*, **9**, 2682-2700. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v9i5.38>
- [29] Issa, I., Wala, K., Dourma, M., Atakpama, W., Kanda, M. and Akpagana, K. (2017) Valeur ethno botanique de l'espèce *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss (meliaceae) auprès des populations riveraines de la chaîne de l'Atacora au Togo. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaire*, **6**, 64-72.
- [30] Sokpon, N. and Ouinsavi, C. (2004) Gestion des plantations de *Khaya senegalensis* au Bénin. *Bois et Forêts des Tropiques*, **279**, 37-46.
- [31] Kokou, K., Atato, A., Bellefontaine, R., Kokuste, A. and Caballé, G. (2006) Diversité des forêts denses sèches du Togo (Afrique de l'Ouest). *Revue d'Ecologie-La Terre et la Vie*, **61**, 225-246.
- [32] Ulrich, G.B.D., Charle, J.J., Loumeto, F., Jacques, C., Gonmadje, D. and McKey, D. (2019) Des confusions entre espèces préjudiciables à la gestion durable des essences forestières, l'exemple des acajous d'Afrique (*Khaya*, Meliaceae). *Bois et Forêts des Tropiques*, **339**, 17-32. <https://doi.org/10.19182/bft2019.339.a31714>
- [33] Sylla, S.N., Samba, R.T., Neyra, M., Ndoye, I., Giraud, E., Willems, A., de Lajudie, P., and Dreyfus, B. (2002) Phenotypic and Genotypic Diversity of *Rhizobia* Nodulating *Pterocarpus erinaceus* and *P. lucens* in Senegal. *Systematic and Applied Microbiology*, **25**, 572-583. <https://doi.org/10.1078/07232020260517715>
- [34] Ouedraogo, A., Adjima, T., Hahn-Hadjali, K. and Guinko, S. (2006) Diagnostic de l'état de dégradation des peuplements de quatre espèces ligneuses en zone soudanaise du Burkina Faso. *Sécheresse*, **17**, 485-491.
- [35] Gaoue, O.G. and Ticktin, T. (2008) Impacts of Bark and Foliage Harvest on *Khaya senegalensis* (Meliaceae) Reproductive Performance in Benin. *Journal of Applied Ecology*, **45**, 34-40. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2007.01381.x>
- [36] Kando, L.F. (2012) Evaluation et caractérisation des caillcedrats (*Khaya senegalensis* (desr.) a. juss) d'alignement de la commune de ouagadougou. Mémoire de fin de cycle. 70 p.
- [37] Guédjé, N.M., Fokunang, N.C., Jiofack, T.R.B. and Dongmo, F.R. (2010) Opportu-

- nités d'une exploitation soutenue des plantes médicinales dans l'aménagement forestier. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **4**, 1346-1372. <http://ajol.info/index.php/ijbcs>
<https://doi.org/10.4314/ijbcs.v4i4.63070>
- [38] Mapongmetsem, P.M., Nkongmeneck, B.A., Rongoumi, G., Dongock, D.N. and Dongmo, B. (2011) Impact des systèmes d'utilisation des terres sur la conservation de *Vitellaria paradoxa* Gaerten. F. (Sapotaceae) dans la région des savanes soudano-guinéennes. *International Journal of Environmental Studies*, **68**, 851-872. <https://doi.org/10.1080/00207233.2011.587259>
- [39] Guillaumet, J.L., Adjanohoun, E., Avenard, J.M., Eldin, M., Girard, G., Circoulin, J., Toucheboeuf, P. and Perraud, A. (1971) Le milieu naturel de Côte d'Ivoire. *Mémoires ORSTOM*, **50**, 156-264.
- [40] Perraud, A. (1971) Les sols. In, Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. *Mémoires ORSTOM*, **50**, 69-390.
- [41] Louppe, D. and Ouattara, N. (1996) Les arboretums d'espèces locales en Nord Côte d'Ivoire. IDEFOR, 14 p. <http://agritrop.cirad.fr/581418>
- [42] Bornand, M., Barthès, J.P. and Bonfils, P. (1999) Carte des pédopaysage de la région languédocienne-Roussillon-Département de l'Hérault. INRA Montpellier. 2 p.
- [43] FAO (2005) State of the World's Forests. 17 p. <http://www.fao.org/3/a-y5574e.pdf>
- [44] Goula, B.T., Brou, K., Brou, T., Savane, I., Vamoryba, F. and Bernard, S. (2007) Estimation des pluies exceptionnelles journalières en zone tropicale, cas de la Côte d'Ivoire par comparaison des lois Log normale et de Gumbel. *Journal des Sciences Hydrologiques*, **52**, 49-67. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.1.49>
- [45] Soro, G.E. (2011) Modélisation statistique des pluies extrêmes en Côte d'Ivoire. Thèse Unique, Université Nangui Abrogoua, Abidjan, 173 p.
- [46] Djaha, J.B.A., N'da, A.A.A., Koffi, E.K., Ballo, C.K. and Coulibaly, M. (2012) Croissance et aptitude au greffage de deux génotypes d'anacardier (*Anacardium occidentale* L.) élites utilisées comme porte-greffe en Côte d'Ivoire. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **6**, 1453-1466. <http://ajol.info/index.php/ijbcs>
<https://doi.org/10.4314/ijbcs.v6i4.5>
- [47] Barry, A.A., Caesar, J., Tank, A.M.G.K., Aguilar, E., McSweeney, C., Cyrille, A.M., Nikiema, M.P., Narcisse, K.B., Sima, F., Stafford, G., Touray, L.M., Ayilari-Naa, J.A., Mendes, C.L., Tounkara, M., Gar-Glahn, E.V.S., Coulibaly, M.S., Dieh, M.F., Mouhaimouni, M., Oyegade, J.A., Sambou, E. and Laogbessi, E.T. (2018) West Africa Climate Extremes and Climate Change Indices. *International Journal of Climatology*, **38**, e921-e938. <https://doi.org/10.1002/joc.5420>
- [48] AISA (2019) Association Ivoirienne des Sciences Agronomiques. 10 p. <https://pratik.ci/annuaire>
- [49] Anonymous (2019) Les données climatiques pour les villes du monde entier, Climat Côte d'Ivoire: Pluviométrie, Température moyenne Côte d'Ivoire. 14 p. <https://fr.climate-data.org/afrique/cote-d-ivoire-134/>
- [50] Berka, S. and Abdelkader, H. (2001) Effets de quelques traitements physico-chimiques et de la température sur la faculté germinative de la graine d'Arganier. *Revue Forestière Française*, **53**, 125-130. <https://doi.org/10.4267/2042/5219>
- [51] Diatta, S., Salifou, I., Sy, M.O., Kabore-Zoungrana, C.Y., Banoin, M. and Akpo, L.E. (2009) Évaluation des potentialités germinatives d'un ligneux fourrager sahélien, *Maerua crassifolia* Forssk., Capparaceae. 1-11. <http://www.irrd.org>
- [52] Zerbo, P., Belem, B., Mllogo-Rasolodimby, J. and Van, D.P. (2010) Germination

- sexuée et croissance précoce d'Ozoroainsignis Del., une espèce médicinale du Burkina Faso. *Cameroon Journal of Experimental Biology*, **6**, 74-80.
<https://doi.org/10.4314/cajeb.v6i2.68524>
- [53] Gorgon, I.T., Olga, D.Y., Komla, E.A., Francois, W. and Kouami, K. (2015) Essai de germination et de croissance au stade juvénile des souches locales de *Jatropha curcas* en république centre africaine. *European Scientific Journal*, **11**, 260-276.
- [54] N'golo, B., Noufou, D.O., Djézou, K., Adama, B. and Fezan, H.T. (2018) Effets de cinq prétraitements sur la germination du vène (*Pterocarpus erinaceus* Poir., Fabaceae) dans la Réserve du Haut Bandama (Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal*, **14**, 438. <https://doi.org/10.19044/esj.2018.v14n30p438>
- [55] Douma, S., Adamou, M.M., Aboubacar, K., Alleidi, I. and Boubacar, A.N. (2019) Effet du régime d'irrigation sur la germination et la croissance en pépinière de *Parikia biglobosa* (Jacq.) G. Don. *Journal of Animal and Plant Sciences*, **40**, 6573-6583.
<http://www.m.elewa.org/IAPS>
- [56] Thiombiano, A., Wittig, R. and Guinko, S. (2003) Conditions of Sexual Multiplication in Some Combretaceae in Burkina Faso. *Revue d'Ecologie-la Terre et la Vie*, **58**, 361-379.
- [57] Ameri, A.H. and Daldoum, A.M.D. (2017) Effect of Different Pretreatment Methods and Materials on Germination Potential of *Faidherbia albida* Seeds. *Scholars Journal of Agriculture and Veterinary Sciences*, **4**, 86-90.
- [58] Giordano, E. (1972) Interaction de la sélection et de la culture intensive. *UnasyIva*, **97-98**, 82-88.
- [59] Salazar, R. and Quesada, M. (1987) Provenance Variation in *Guazuma ulmifolia* L. in Costa Rica. *Commonwealth Forestry Review*, **66**, 317-324.
- [60] Dianda, M. and Chalifour, F.P. (2002) Effets du N minéral et du génotype de la plante sur la croissance et la nodulation de *Faidherbia albida*. *Canadian Journal of Botany*, **80**, 241-254. <https://doi.org/10.1139/b01-145>
- [61] Maranz, S. and Wiesman, Z. (2003) Evidence for Indigenous Selection and Distribution of the Shea Tree, *Vitellaria paradoxa*, and Its Potential Significance to Prevailing Parkland Savanna Tree Patterns in Sub-Saharan Africa North of the Equator. *Journal of Global Biogeography*, **30**, 1505-1516.
<https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2003.00892.x>
- [62] Soloviev, P., Niang, T.D., Gaye, A. and Totte, A. (2004) Variabilité des caractères physicochimiques des fruits de trois espèces ligneuses de cueillette, récoltés au Sénégal, *Adansonia digitata*, *Balanites aegyptiaca* et *Tamarindus indica*. *Fruits*, **59**, 109-119.
<https://doi.org/10.1051/fruits:2004011>
- [63] Assogbadjo, A.E., Sinsin, B., Codjia, J.T.C. and Van Damme, P. (2005) Ecological Diversity and Pulp, Seed and Kernel Production of the Baobab (*Adansonia digitata*) in Benin. *Belgian Journal of Botany*, **138**, 47-56.
- [64] Assogbadjo, A.E., Kyndt, T., Sinsin, B., Gheysen, G. and Van Damme, P. (2006) Patterns of Genetic and Morphometric Diversity in Baobab (*Adansonia digitata* L.) Populations across Different Climatic Zones of Benin (West Africa). *Annals of Botany*, **97**, 819-830. <https://doi.org/10.1093/aob/mcl043>
- [65] Dianda, M., Bayala, J., Diop, T. and Ouédraogo, S.J. (2009) Improving Growth of Shea Butter Tree (*Vitellaria paradoxa* C.F. Gaertn.) Seedlings Using Mineral N, P and Arbuscular Mycorrhizal (AM) Fungi. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, **13**, 93-102.
- [66] Sambe, M.A.N., Sagna, M. and Sy, M.O. (2010) Seed Germination and *in Vitro*

- Plant Regeneration of *Parkia biglobosa* (Jacq.) Benth. *African Journal of Biotechnology*, **9**, 3099-3108.
- [67] FAO (1992) Guide de manipulation des semences forestières. Etude FAO forêt 20/2. 20 p. <http://www.fao.org/docrep/006/AD232F/AD232F00.HTM>
- [68] Laurie, M.V. (1974) Tree Planting Practices in African Savannas. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 42-43.
- [69] Naidu, C.V. and Rajendrudu, G. (2001) Influence of Kinetin and Nitrogenous Salts on Seed Germination of Red Sanders (*Pterocarpus santalinus* Linn. f.). *Seed Science and Technology*, **29**, 669-672.
- [70] Zhang, C.Y., *et al.* (2015) Soaking, Temperature, and Seed Placement Affect Seed Germination and Seedling Emergence of *Litchi chinensis*. *HortScience*, **50**, 628-632. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.50.4.628>
- [71] Kolodziejek, J. (2017) Effect of Seed Position and Soil Nutriment on Seed Mass, Germination and Seedling Growth in *Peucedanum oreoselinum* (Apiaceae). *Scientific Reports*, **7**, Article No. 1959. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-02035-1>
- [72] Gnanglè, P.C.R., Glele, K., Oumorou, M., N'djolosse, K., Bonou, W. and Sokpon, N. (2010) Tests de croissance de jeunes plants de néré (*Parkia biglobosa*, Jack, R. Br.) en pépinière. *International Journal of Biological and Chemical Science*, **4**, 1939-1952. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v4i6.64945>
- [73] Esmailpour, A. and Van, P. (2016) Evaluation of Seed Soaking Times on Germination Percentage, Germination Rate and Growth Characteristics of Pistachio Seedlings. *Acta Horticulturae*, **1109**, 107-112. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1109.17>
- [74] Sanjay, S., Ranjana, B., Varghese, S.K. and Naithani, S.C. (2008) Effect of Hot-Water Treatment on Seed Germination of Some Fast Growing Tropical Tree Species. *Journal of Tropical Forestry*, **24**, 49-53.
- [75] Repoblika, M. (1963) Introduction de *Khaya senegalensis* (Caïlcedra) ou acajou du Sénégal au Madagascar. Fahafahana-Tanindrazana-Fandrosoana. 15 p. [https://uses.plantnet-project.org/fr/Khaya_senegalensis_\(PROTA\)](https://uses.plantnet-project.org/fr/Khaya_senegalensis_(PROTA))
- [76] Ahoton, L.E., Adjakpa, J.B., M'po, I.M. and Akpo, E.L. (2009) Effet des prétraitements des semences sur la germination de *Prosopis africana* (Guill., Perrot et Rich.) Taub., (Césalpiniacées). *Tropicultura*, **27**, 233-238.

PUBLICATION 2

Beda Innocent Adji, Doffou Sélastique Akaffou, Kouadio Henri Kouassi, Yao Patrice Houphouet, Jérôme Duminil and Sylvie Sabatier. **2021**.

THE EFFECT OF FOUR ABIOTIC FACTORS ON MACRO-ANATOMICAL MARKERS DEVELOPMENT IN *PARKIA BIGLOBOSA*, JACK, R. BR., 1830 (FABACEAE) CROWN. *American Journal of Plant Sciences*, 12, 645- 661. <https://doi.org/10.4236/ajps.2021.124044>

The Effect of Four Abiotic Factors on Macro-Anatomical Markers Development in *Parkia biglobosa*, Jack, R. Br., 1830 (Fabaceae) Crown

Beda Innocent Adji, Doffou Sélastique Akaffou, Kouadio Henri Kouassi, Yao Patrice Houphouet, Jérôme Duminil, Sylvie-Annabel Sabatier

► **To cite this version:**

Beda Innocent Adji, Doffou Sélastique Akaffou, Kouadio Henri Kouassi, Yao Patrice Houphouet, Jérôme Duminil, et al.. The Effect of Four Abiotic Factors on Macro-Anatomical Markers Development in *Parkia biglobosa*, Jack, R. Br., 1830 (Fabaceae) Crown. American Journal of Plant Sciences, Scientific Research Publishing, 2021, 12 (04), pp.645-661. 10.4236/ajps.2021.124044 . hal-03211834

HAL Id: hal-03211834

<https://hal.inrae.fr/hal-03211834>

Submitted on 29 Apr 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



The Effect of Four Abiotic Factors on Macro-Anatomical Markers Development in *Parkia biglobosa*, Jack, R. Br., 1830 (Fabaceae) Crown

Beda Innocent Adji^{1,2,3*}, Doffou Sélastique Akaffou¹, Kouadio Henri Kouassi¹, Yao Patrice Houphouet¹, Jérôme Duminil^{4,5}, Sylvie Sabatier^{2,3}

¹Université Jean Lorougnon Guédé, Agroforestry UFR, Daloa, Côte d'Ivoire

²CIRAD, UMR AMAP, Montpellier, France

³AMAP, Université Montpellier, CIRAD, CNRS, INRAE, IRD, Montpellier, France

⁴IRD, UMR-DIADE, Montpellier Cedex 5, France

⁵DIADE, Université Montpellier, CIRAD, IRD, Montpellier, France

Email: *adjibedainnocent@gmail.com, *beda-innocent.adji@cirad.fr

How to cite this paper: Adji, B.I., Akaffou, D.S., Kouassi, K.H., Houphouet, Y.P., Duminil, J. and Sabatier, S. (2021) The Effect of Four Abiotic Factors on Macro-Anatomical Markers Development in *Parkia biglobosa*, Jack, R. Br., 1830 (Fabaceae) Crown. *American Journal of Plant Sciences*, **12**, 645-661.

<https://doi.org/10.4236/ajps.2021.124044>

Received: March 6, 2021

Accepted: April 26, 2021

Published: April 29, 2021

Copyright © 2021 by author(s) and Scientific Research Publishing Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Interpretation of primary growth markers (modules) is neglected in sustainable resource management processes, yet it opens up prospects for long time series on tree crown development, necessary for their characterization in the current context of climate change. This study aimed to assess the morphological variation of crown shoots in *Parkia biglobosa* in the face of a changing environment. Axis growth modules of 420 individuals of different ages were retrospectively analyzed in the presence or absence of shading during the wet and dry seasons in seven localities in Côte d'Ivoire. The results showed that the developmental environment of individuals did not influence the growth modules dimensions ($P > 0.05$). However, module size remained significantly different between locations ($P < 0.05$). The southern part of the gradient is still favourable and has priority for the establishment of permanent plots. The modules morphology differs from the youngest to the oldest individuals ($P < 0.05$). The rainy season remains the ideal period for the implementation of agroforestry reforestation programmes based on this species ($P < 0.05$). *Parkia biglobosa* is a monochasial sympod (Pseudo-monopod) with a relay axis that follows the Paul Champagnat architectural model in the young stage, and transits to the Wilhelm Troll model later in the adult and old stage. This information contributes to the understanding of the functioning of crown and the adaptation of this species to a varying environment. It could guide choice of suitable environment and ideal genotype for the implementation of a reforestation or agroforestry programme based on *Parkia biglobosa*.

Keywords

Parkia biglobosa, Environment, Development, Growth Modules, Crown

1. Introduction

Architectural and retrospective analysis is very important for the monitoring and sustainable management of trees [1] [2]. Architectural analysis allows us to interpret the overall structure of the tree and to understand the morphological mechanisms that gave birth to it; retrospective analysis allows us to trace the past growth of trees via morphological markers left by growth stoppages due to the dry seasons. In fact, the latter provides access to long-term growth series for understanding and interpreting the structural functioning of tree crowns, the choice of resilient and adapted ideotypes, and the choice of environment conducive to the establishment of permanent plots necessary for their sustainable management [3] [4].

Several studies of sustainable management of plant genetic resources via architectural and retrospective analysis have proven effective in Europe and Latin America [5] [6] [7] [8]. These methods have not yet been applied to species in Africa; indeed, studies on architectural and retrospective analysis for the sustainable management of many overexploited species in Africa are almost absent. We believe that these methods should be applied in Africa, specifically in West Africa. This would allow a better understanding of the coordination over time of growth processes (elongation, thickening) of shoots within the crown and the associated morpho-anatomy essential for long-term retrospective analysis of sustainable management, tree development and any analysis of the causes of observed variations [1]. In view of the need to characterise plant responses to current climate change, such retrospective analysis will be welcome as a complement to data from permanent plots.

Our study focused on a well-known tree from sub-Saharan Africa, *Parkia biglobosa* (Fabaceae), for several reasons: 1) it is an emerging tree still in the wild and widely distributed in this area [9]; 2) it is a beloved and overexploited species for its food, medicinal and socio-cultural function [10] [11]; 3) it is an agroforestry species with soil restorative properties (Leguminosae) [12]; 4) the genus *Parkia* has anatomical features suitable for counting annual rings [13]; 5) this specie present unusual morphological features (modules) suitable for determining growth modules or units, which makes it particularly interesting for a retrospective study of savanna tree shoot growth.

This study aimed to characterise the development of growth modules in the crown of *Parkia biglobosa* in the face of a changing environment in Côte d'Ivoire through retrospective analysis. This approach would allow us to understand: 1) the variability of shoot size in relation to different habitats; 2) the adaptability of the species to various environments; 3) to identify genotypes adapted and resis-

tant to climatic variations and 4) to guide the choice of priority and favourable environments for the establishment of permanent plots (species domestication) within the framework of possible “Néré” based agroforestry programmes in Côte d’Ivoire.

2. Material and Methods

2.1. Plant Material

The plant material is made up of axis of 420 individuals of different ages chosen randomly and arbitrarily in natural stands according to two types of habitats. The criteria for sorting the age categories, the dendrometric characteristics and the number of individuals per age category and per habitat type as well as the age types examined are recorded in **Table 1**.

2.2. Methods

2.2.1. Study Sites

Study was carried out at seven locations in Côte d’Ivoire. The study sites are arranged along a South-North bioclimatic gradient. The localities were chosen according to the specific vegetation to the *Parkia biglobosa* species (**Figure 1**). The characteristics of the surveyed locations are recorded in **Table 2**.

2.2.2. Observation Method

1) Individuals selection and sorting by age category

A total of 420 individuals from natural regeneration were sampled and sorted by age category (young, adult and old). The age of the individuals was arbitrarily chosen on the basis of the size (height and diameter) of individuals raised in nurseries and of individuals present on old plots set up by the CNRA (*Centre National de Recherche Agronomique*) of Côte d’Ivoire in the 1980s in the Korhogo

Table 1. Age selection criteria, dendrometric characteristics and number of individuals used in relation to age and habitat in *Parkia biglobosa*.

Ages	Habitats/environments	H (m)			D or DBH (cm)			Indiv-Nbr	Axis examined
		Mini	Maxi	Mea	Mini	Maxi	Mea		
Young tree (1 - 5 Yr) H (m): 0.1 - 6; D (cm): 1 - 19	Full sunlight	0.53	5.5	1.95 ± 0.11	0.56	18.96	4.35 ± 0.24	70	Main stem
	Undergrowth/shading	0.42	5.8	2.56 ± 0.05	1.26	17.83	7.06 ± 1.22	70	Main stem
Adult tree (6 - 20 Yr) H (m): 7 - 14; D (cm): 20 - 50	Full sunlight	7.5	11	9.68 ± 1.14	20.06	49.68	38.19 ± 3.02	70	Branch
	Undergrowth/shading	8	13.7	12.02 ± 1.01	22.4	48.8	36.27 ± 1.53	70	Branch
Old tree (21 Yr ≤) H (m): 15 ≤; D (cm): 60 ≤	Full sunlight	18	31.7	25.22 ± 3.21	61.3	178.44	85.51 ± 6.12	70	Branch
	Undergrowth/shading	20.5	29.5	25.3 ± 3.32	60.1	115.61	76.98 ± 7.36	70	Branch

Yr = Year old, **H** = Height, **D or DBH** = Diameter or diameter at breast height, **Mini** = minimum, **Maxi** = Maximum, **Moy** = Mean, **m** = meter, **cm** = centimeter, **Indiv-Nbr** = number of individuals assessed.

Table 2. Characteristics of the surveyed localities [14]-[28].

Sites/locations	GPS coordinates	Vegetation	Climate	Temperature (°C)	Rainfall (mm/year)	Soil type
Ferké	5°23'43.39644"W; 9°36'1.87056"N	Grassy and little wooded savannah	Dry tropical	27 - 40	263 - 1200	Ferrallitics soil (Ferrisols, Cambisols, Fluvisols, Luvisols), highly to moderately desaturated.
Korhogo	5°36'12.39612"W; 9°33'24.68988"N	Open forest (wooded savannah)	Dry tropical	26.6 - 35.7	817 - 1216	Ferruginous (90%) and Ferrallitic (10%): superficial gravelly soil, deep gravel with a heavy texture, low in organic matter, highly desaturated.
Niakara	5°18'40.73544"W; 8°40'47.97912"N	Wooded and grassy savannah	Dry tropical	24.7 - 38	800 - 1230	Complex of slightly desaturated ferrallitic soils and eutrophic brown tropical soils derived from basic rocks.
Katiola	5°7'35.814"W; 8°13'53.94"N	Wooded and grassy savannah	Dry tropical	24 - 36	1100 - 1200	Moderately and highly desaturated ferrallitic soils
Bouaké	5°5'47.3289"W; 7°40'45.335"N	Clear forest (wooded savannah)	Wet tropical	23.6 - 34	1100 - 1200	Gravelly, moderately saturated, reworked, shallow ferrallitic gravel from a granitic alteration material with a sandy-clay texture.
Toumodi	5°1'34.95576"W; 6°22'42.67848"N	Open forest (wooded savannah, grassland and gallery forests)	Wet tropical	26.6 - 30	1092 - 1200	Ferrallitic soil on granitic bedrock (sandy-clayey soil), characterised by the weak differentiation and friable consistency of their horizons.
Daloa	6°26'9.19788"W; 6°54'32.058"N	Tropical rainforest	Wet tropical	21 - 34	1000 - 1900	Ferrallitic, deep, acidic and desaturated in exchangeable bases, rich in organic matter.

°C = Celsius degree, mm = millimeter, W = west, N = North.

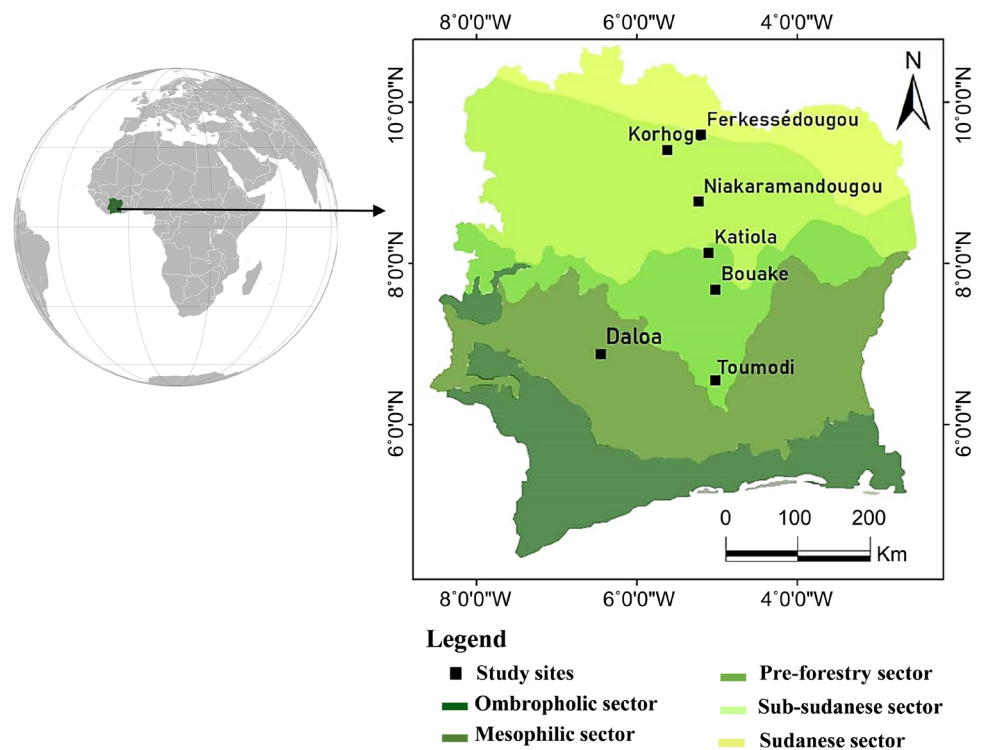


Figure 1. Location of the study area.

locality. The characteristics of the age groups as well as the criteria for sorting individuals by age category are recorded in **Table 1**. 10 individuals were identified by chance and evaluated by habitat and age in each locality surveyed in the rainy season (optimal condition) and in the dry season (restrictive condition). We therefore have for each age category (Young, Adult and Old), 10 individuals identified and evaluated by habitat type (Undergrowth/Darkness and Full Sun/Sun) in each of the 7 localities above ($10 \times 3 \times 2 \times 7 = 420$ individuals) (**Table 1**).

2) Choice of axis and habitat type

Observations were made on different types of axes depending on the accessibility of the crowns in two different habitats. For young trees, the axes assessed were the main trunks because of the easy access and the non-frequency of secondary branches on all individuals in this category. For mature and old trees, the axes assessed were only tertiary branches and short twigs due to accessibility. Assessments were carried out in situ for young trees; whereas for mature and old trees, branches were cut and transported to the laboratory for observations. Two types of environments were considered: undergrowth and full sun. The former refers to individuals living in a very shaded environment with a forest canopy or in an overcrowded environment or with superior shelter. The latter refers to individuals isolated in full sun or in an open environment in direct contact with sunlight.

3) Identification of primary markers (Modules) of growth by analysis

This analysis is made possible by the recognition of morphological markers that result from the functioning of meristems and that remain for several years. These morphological markers are the scars left by bud scales, cataphylls and deciduous leaves, naturally pruned twigs, a bend in the axis at the site of apical necrosis or trauma, the texture of the bark, etc. The growth unit or elongation unit or morphological unit or extension unit (GU) [6] [8] [29] [30], corresponding to the set of organs (phytomeres) initiated by the apical meristem during an uninterrupted phase of organogenesis and elongation is delimited at its base by a large number of scars of pairs of scales (7 to 16) left by the terminal bud. From this characteristic, it is possible to identify the successive growth units arranged along a leafy stem.

In general, two types of shoots are generated by the establishment of growth units by the terminal bud: monocyclic shoots (establishment of a single growth unit during a year or spring growth wave) and polycyclic shoots (establishment of several growth units during a year or spring and summer growth waves) [3] [6] [32]. If the first GU (spring growth wave) can be qualified as preformed (in the sense of [33]: presence of all the leaf organs of the future GU in the bud before its budburst), some organs in the GU are qualified as neoformed (prolongation of the setting of the leaf organs by the apical meristem in the same time after the preformed organs). In the tropics, the majority of shoots are polycyclic due to a rhythmicity adopted by the growth of species in this zone [33] [34]. This is the case for *Parkia biglobosa*.

In *Parkia biglobosa*, the growth units (GU) or macro-anatomical markers cor-

respond to modules (MOD), due to a defined and limited growth of the axes generally caused by an apical trauma (death of apex), the axillary bud close to the apex thus takes over, until it also dies, and so on. The structure of the axis thus has a twisted appearance (**Figure 2**); we speak of a modular plant because of a succession of structures or several superposed modules [6] [34]. Indeed, the axis of these types of plants is a branched structure resulting from the functioning of several meristems and, depending on the number of branches formed, we speak of a monochasial (one relay axis), dichasial (two relay axes) or polychasial (several relay axes) sympod.

4) Parameters evaluated

The retrospective analysis focused on the first four growth modules (MODs) from the apical apex of the sampled axis. Morphological parameters assessed on each axis concerned the total number of modules carried by the observed axis, the length of each module, the diameter at the base of each module and the number of leaves or phytomers of the first four modules from the tip (apical start) of the sampled axes [1] [4] [35] [36]. The harvested stems and branches were split (longitudinal and transverse cuts) to identify growth stops (portions delimiting modules) imperceptible on the bark of the axes. Data were collected during the rainy season and this action was repeated on the same individuals during the dry season.

2.2.3. Statistical Data Analysis

Statistical analyses were first performed using one-dimensional descriptive statistics and linkage analysis methods using XLSTAT 2020 version 7.5. The



Figure 2. Images related to morphology and growth boundaries or growth stops (GS) of macro-anatomical markers or Growth modules (MOD) in *Parkia biglobosa*.

difference between the evaluated parameters was carried out by means of one-way analyses of variance (ANOVA) with SAS software version 9.4. The Student-Newman-Keuls test at the 5% threshold was used for post hoc comparisons.

3. Results

3.1. Architectural Development of the Individuals Observed

According to the observations, the architectural development of the species is sympodial monochasial with only delayed relaying (delayed growth and branching). The terminal bud dies after a certain period of elongation, the axillary bud closest to the terminal bud takes over and so on. The plant appears as a pseudo-monopod with a twisted trunk structure. *Parkia biglobosa* can be classified in the architectural model of Paul Champagnat (1921-2011) and also of Wilhelm Troll (1897-1978) because of the way it builds its structure. Indeed, according to our remarks, the development of the species is a repeated complex of unbranched and discretely branched axes with short branches. The axes are vertical at their base and their distal end is by large radius curvature, reduced to horizontal or collapsed due to gravity and the flexibility of the wood. The leaves are spirally inserted and the flowering is sometimes lateral, sometimes terminal. In the young stage, the plant adopts the Champagnat pattern, while in adulthood and old age, the Troll pattern is more expressive.

3.2. Morphological Characteristics of Growth Modules

Globally, the number of growth modules carried by the observed axes varied from 2 to 26 with an average of 10.08 ± 4.24 ; the average length of the Modules varied from 3.85 to 51.40 cm with an average of 18.57 ± 8.15 cm; the average diameter of the Modules varied from 0.43 to 8.81 cm with an average of 1.43 ± 0.82 cm. The average number of phytomers counted per Module varied from 5.5 to 33.5 with an average of 15.09 ± 5.35 . The morphology and limits of the growth modules are presented in **Figure 2**.

Figure 3 shows the average distribution of the number and length of phytomers per growth module (MOD) as well as the growth stop or growth boundary zones (GS) along a *Parkia biglobosa* axis.

3.3. Influence of the Habitat on Growth Modules Morphology

Analysis of the variance of modules morphological dimensions present on the observed axes according to the two environments considered (**Table 3**), showed that the morphology of the modules of the axes exposed to sunlight is statistically identical to the morphology of the modules of the axes benefiting from a superior shelter ($P > 0.05$). The environment in which this species evolves does not seem to have an effect on the dimensions of the modules. In *Parkia biglobosa*, the type of habitat (bright or dark light) does not significantly influence the morphology of the growth modules ($P > 0.05$).

Table 3. Comparison of modules morphological parameters according to the habitat type.

Habitat	Tree-H (m)	Tree-Diam (cm)	Axis-Nbr-Mo	Mo-leng (cm)	Mo-Diam (cm)	Mo-Phyto-Nbr
Full sun	10.41 ± 1.23 a	32.72 ± 3.46 a	9.8 ± 0.46 a	18.73 ± 0.88 a	1.43 ± 0.09 a	14.61 ± 0.53 a
Min-Max	0.53-31.7	0.56-178.44	2-26	3.85-51.4	0.43-8.81	5.5-30.5
Shadowing	10.43 ± 1.76 a	29.72 ± 3.45 a	10.64 ± 0.55 a	18.25 ± 1.08 a	1.42 ± 0.07 a	16.05 ± 0.79 a
Min-Max	0.42 - 28.3	1.26 - 113.44	5 - 19	6.25 - 41.5	0.5 - 2.77	6.5 - 33.5
Pr > F	0.9771	0.5213	0.2685	0.7440	0.9280	0.1277

Values with the same letters are not statistically different at the 5% level. **Tree-H (m)**= tree height in meters; **Tree-Diam (cm)**= diameter at breast or crown height of the tree in centimetres; **Axis-Nbr-Mo**= number of modules or growth units carried by the measured axis; **Mo-leng (cm)**= average length of modules or growth units in centimetres; **Mo-Diam (cm)**= average diameter of modules or growth units in centimetres; **Mo-Phyto-Nbr**= average number of phytomers carried by the modules or growth units; **Min** = minimum et **Max** = maximum.

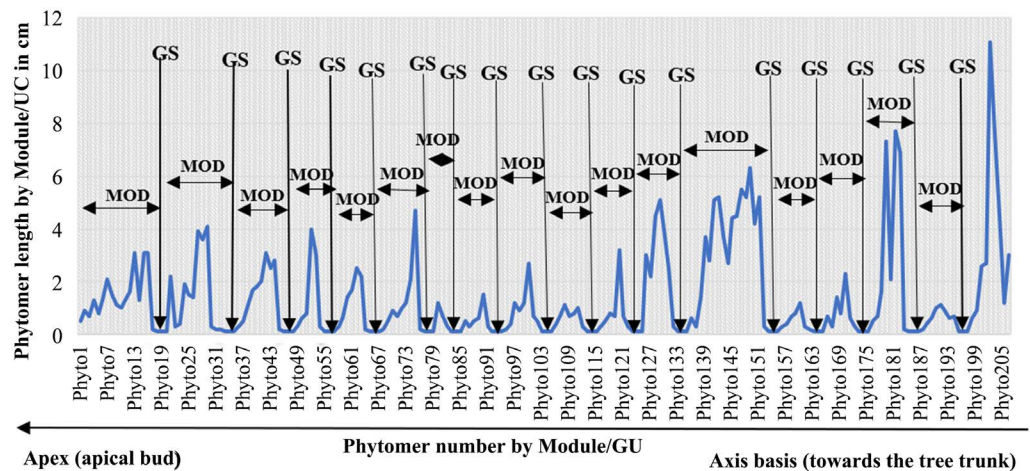


Figure 3. Modelling of growth, rank and average distribution of the number of phytomers by growth module along the observed axes in *Parkia biglobosa*. **MOD/GU** = Module or growth unit, **GS** = Growth stop or module limits, **cm** = Centimeter.

3.4. Influence of the Surveyed Locations on Growth Modules Morphology

The comparison of the measured parameters (**Table 4**) according to the locations, showed a significant difference between the locations visited for each parameter of module morphology evaluated ($P < 0.05$). All module dimensions were neither increasing nor decreasing according to the arrangement of the localities along the defined South-North vegetation gradient. However, the modules were well developed in the localities of Bouaké and Katiola in the south of the defined gradient. In *Parkia biglobosa*, the morphology of the modules differed according to the characteristics of the study area ($P < 0.05$).

3.5. Individuals Age Influence on the Growth Modules Morphology

The results showed that the majority of the morphological parameters of the modules differed significantly between the ages ($P < 0.05$), except for the mean diameter of the modules, which remained statistically identical regardless of age ($P > 0.05$). The number of modules per axis was higher in mature trees, while the

Table 4. Variation of the morphological parameters of growth modules according to the localities surveyed.

Localities	Tree-H (m)	Tree-Diam (cm)	Axis-Nbr-Mo	Mo-leng (cm)	Mo-Diam (cm)	Mo-Phyto-Nbr
Ferké	15.51 ± 3.76 a	55.28 ± 7.87 a	9.39 ± 1.61 b	16.32 ± 2.02 bc	1.51 ± 0.08 ab	16.75 ± 1.03 ab
Min-Max	2.3 - 29.5	5.4 - 178.44	5 - 17	3.85 - 51.4	0.87 - 3.2	9.5 - 30.5
Korhogo	12.86 ± 2.09 ab	38.41 ± 4.06 ab	10.14 ± 0.55 abc	13.81 ± 1.3 c	1.13 ± 0.09 b	12.36 ± 0.94 bc
Min-Max	1.4 - 27.5	2.3 - 84.4	5 - 17	4.23 - 26	0.69 - 1.56	6.75 - 19.75
Niakara	15.98 ± 1.33 a	46 ± 3.59 a	11.32 ± 0.87 a	19.69 ± 1.51 b	1.49 ± 0.37 ab	20.69 ± 0.62 a
Min-Max	2.4 - 28.5	6.8 - 83	7 - 18	11.13 - 35.4	0.95 - 2.77	16 - 33.5
Katiola	7.37 ± 2.11 b	21.37 ± 3.5 b	10.63 ± 0.69 abc	23.01 ± 1.35 ab	1.67 ± 0.05 ab	15.5 ± 0.69 b
Min-Max	0.73 - 28.30	1.25 - 113.44	4 - 26	11.93 - 38.95	0.97 - 2.16	8 - 20.5
Bouaké	6.45 ± 2.6 b	20.46 ± 7.86 b	11.12 ± 1.21 a	24.59 ± 2.13 a	1.76 ± 0.14 a	15.84 ± 1.46 b
Min-Max	1.14 - 31.7	1.79 - 115.61	3 - 19	9.88 - 38.5	0.65 - 2.73	5.5 - 23.25
Toumodi	11.35 ± 0.02 ab	29.74 ± 0.08 ab	12.2 ± 0.52 a	20.55 ± 1.15 b	1.93 ± 0.03 a	15.28 ± 0.37 b
Min-Max	0.77 - 30	2.96 - 73	5 - 19	9.55 - 41.5	1.01 - 8.81	10 - 20.75
Daloa	0.64 ± 0.03 c	1.33 ± 0.01 c	6 ± 0.67 c	14.51 ± 2 c	0.62 ± 0.1 c	8.9 ± 0.97 c
Min-Max	0.42 - 0.87	0.56 - 2.04	2 - 13	9.3 - 31.6	0.43 - 0.97	6 - 12
Pr > F	0.0001	0.0001	0.0009	0.0001	0.0089	0.0001

Values with the same letters are not statistically different at the 5% level.

Table 5. Variation in modules morphological parameters according to the individuals sampled age.

Ages	Tree-H (m)	Tree-Diam (cm)	Axis-Nbr-Mo	Mo-leng (cm)	Mo-Diam (cm)	Mo-Phyto-Nbr
Old tree	25.23 ± 1.64 a	82.36 ± 6.99 a	10.61 ± 0.52 ab	16.92 ± 0.97 b	1.53 ± 0.06 a	17.34 ± 0.90 a
Min-Max	18 - 31.7	60.1 - 178.44	5 - 14	5.05 - 26.3	0.75 - 2.16	10.5 - 30.5
Adult tree	10.81 ± 1.26 b	37.47 ± 2.32 b	11.21 ± 0.48 a	16.94 ± 1.18 b	1.59 ± 0.16 a	15.82 ± 0.59 a
Min-Max	7.5 - 13.7	20 - 49.68	6 - 19	3.85 - 51.4	0.69 - 8.81	6.75 - 25.75
Young tree	2.15 ± 0.81 c	5.24 ± 1.11 c	9 ± 0.63 b	20.52 ± 1.1 a	1.26 ± 0.07 a	13.56 ± 0.72 b
Min-Max	0.42 - 5.8	0.56 - 18.96	2 - 26	9.2 - 41.5	0.43 - 2.77	5.5 - 33.5
Pr > F	0.0001	0.0001	0.0174	0.0336	0.0755	0.0027

Values with the same letters are not statistically different at the 5% level.

average module length was higher in younger trees (**Table 5**). Old and mature trees had higher numbers of internodes per module than younger trees (**Table 5**). In *Parkia biglobosa*, the age of the individuals influenced the morphological dimensions of the growth modules ($P < 0.05$).

3.6. Influence of Humidity on the Growth Modules Morphology

The average diameter of the growth modules did not vary significantly between seasons (**Table 6**); humidity did not have a major influence on the diameter of the growth modules ($P > 0.05$). In contrast, the number of modules per axis observed, the average length of growth modules and the average

Table 6. Comparison of modules morphological dimensions according to season collection.

Seasons	Tree-H (m)	Tree-Diam (cm)	Axis-Nbr-Mo	Mo-leng (cm)	Mo-Diam (cm)	Mo-Phyto-Nbr
Rainy	10.87 ± 1.04 a	35.3 ± 2.79 a	11.6 ± 0.38 a	27.02 ± 1.07 a	1.47 ± 0.13 a	16.09 ± 0.72 a
Min-Max	0.53 - 31.7	0.56 - 178.44	2 - 26	4.23 - 51.4	0.45 - 8.81	6.75 - 25.75
Dryer	9.94 ± 1.47 a	27.91 ± 4.07 a	8.47 ± 0.53 b	18.1 ± 0.87 b	1.39 ± 0.06 a	14.04 ± 0.51 b
Min-Max	0.42 - 30	0.9 - 85.5	4 - 18	3.85 - 41.5	0.43 - 3.2	5.5 - 33.5
Pr > F	0.3201	0.143	0.0001	0.0043	0.5666	0.0201

Values with the same letters are not statistically different at the 5% level.

number of phytomer carried by growth modules differed significantly between seasons ($P < 0.05$). The majority of the dimensions increased during the rainy season (**Table 6**). In *Parkia biglobosa*, humidity influenced the majority of the morphological dimensions of the growth modules ($P < 0.05$), except the mean diameter ($P > 0.05$).

4. Discussion

Growth dynamics in the crown of plants over the course of a season are the consequence of changes in architectural traits. How plants exploit and survive in a given environment, from an abiotic (climate) or biotic (interaction) point of view, is of key importance for their sustainable management. Sustainable management of plant genetic resources must take into account all possible aspects of scientific research, including architectural concepts (retrospective analysis) and the phenological cycle (diagnostic) of trees. This study addressed the effect of habitat, different localities along an environmental gradient, age of individuals and humidity on the morphology of growth modules carried by different axis types in *Parkia biglobosa* in Côte d'Ivoire.

4.1. Development of Modules and Architectural Characters of Individuals

The results showed that the boundaries of the Modules are represented by successively very short internodes (**Figure 2** and **Figure 3**). These observations were found on Guayule (*Parthenium argentatum*) [37] [38] [39] and on *Parkia velutina* [1] etc. *Parkia biglobosa* has a sympodial architectural development with a single relaying axis (monochasial sympod), in contrast to Guayule (*Parthenium argentatum*) which is a sympod with several relay axes (polychasial sympod). Guayule belongs to the architectural model of Anthony Leeuwenberg like cassava. [34] indicated that *Parkia biglobosa*, of the Fabaceae family had an architectural development following the model of Wilhelm Troll, we think that the architectural model of this species also integrates that of Paul Champagnat according to our observations. This remains to be verified in further studies on the architectural analysis of *Parkia biglobosa*.

4.2. Habitat Influence on Growth Modules

In our study, the environment in which the individuals evolved did not significantly influence the morphological dimensions of the growth modules ($P > 0.05$). This is due to the fact that we considered individuals of all age types observed in this environment in a global manner. The finding might be different if the observations on morphological dimensions were made only and separately by age category. Alternatively, this fact is due to the nature of the species; indeed, some species respect their own genetic programme of architectural development regardless of environmental stress [34]. Moreover, this species is a slow-growing savannah [9], and therefore the immediate perception of the effect of light on shoot growth might be difficult. Normally in a given plant, individuals in the shade (undergrowth) should be less developed than those exposed to the sun (full sun) as in the studies of [3] on *Fagus sylvatica* and of [40]. However, plants growing in the shade are very often tall and etiolated because of the terminal bud's search for bright light for photosynthetic activity. Indeed, bright light is the key factor for growth, it guarantees a good growth in length and width of plants contrary to dark light [40] [41] [42].

4.3. Influence of Locality on Growth Modules

The variation in morphological parameters between locations is due to the specific and distinct environmental characteristics of each location surveyed (climate, soil type, rainfall, relative humidity etc.). We had thought that the morphological dimensions of the measured Modules would be ordered in an increasing or decreasing manner according to the layout of the surveyed localities. This was not the case; in fact, even if the surveyed localities are arranged according to a "pseudo-climatic" gradient of dense vegetation decreasing towards the north, each locality has its own distinctive characteristics. Moreover, in the current context of climate change, climatic and microclimatic parameters are very unstable, uncontrolled and vary greatly within a day. Several studies have shown that the depth and fertility of the soil, the environment and even the age of individuals influence the architectural development of species [30] [42] [43]. [44] and [45] have also indicated in their research that climate or an ecological gradient has an effect on plant morphology. Similarly, studies by [46] and [47] [48] indicated that the origin of differences in tree morphology is due to factors such as soil type and the genetic characteristics of the individuals sampled. On the other hand, the modules were well developed in the southern part of the defining gradient (Bouaké and Katiola). This area could be a favourable and priority area for establishing permanent plots and increasing the success rate of reforestation or agroforestry programmes using this species.

4.4. Influence of Individuals Age on the Growth Modules Morphology

The morphological dimensions of the modules evaluated varied with the age of

the individuals ($P < 0.05$). The number of phytomeres per module is higher in old and mature trees, due to their age and the preformation of organs in the latent buds. In young trees, module length is higher due to the growth dynamics of young shoots (more intense meristematic activity). Indeed, some studies have shown that the age of individuals influences tree morphology [31] [43] [47] [48]. Age strongly modifies the morphological dimensions of plant organs regardless of location, due to very different functional capacities (number of photosynthetic leaves, evapotranspiration capacity, mineral storage, root suction etc.) and structural dimensions (root and leaf sizes, space occupancy etc.). Young individuals with well-developed modules than the other two categories could be suitable ideotypes in the search for resilient genotypes adapted to global change for the establishment of plots based on this species by cuttings.

4.5. Influence of Season

In the rainy season the size of the modules increases. This period is favourable to the synchronised bud break of the terminal buds of the axes. In French Guiana, [1] observed the same phenomenon on *Parkia velutina*. The meristems of the buds, which have long remained dormant or in slow growth due to a long dry season, take advantage of this period to maximise their development. Indeed, water is vital for plants and its availability guarantees a good physiological and harmonious functioning of plants (metabolism, photosynthesis, organogenesis etc.). Whereas water stress slows down all physiological activity and causes their decline. [49] has indicated in his research the positive effects of water regime on plant growth and development. In the process of establishing a plot or implementing reforestation or agroforestry programmes based on *Parkia biglobosa*, the rainy season remains the best and most favourable period.

5. Conclusion and Perspectives

This study observed and identified the types of variation in the morphology of growth modules as a function of various abiotic parameters in *Parkia biglobosa*. It was found that the developmental environment of the plants did not significantly influence the dimensions of the growth modules ($P > 0.05$). While the morphological dimensions of the modules differed significantly between locations ($P < 0.05$). The age of the individuals influences the size of the growth modules ($P < 0.05$); with the exception of the average diameter of the modules, which remains identical regardless of age ($P > 0.05$). In the rainy season, the morphological dimensions of the modules increase significantly due to the favourable water regime for synchronised bud break of the terminal buds of the axes ($P < 0.05$). From this study, we conclude that *Parkia biglobosa* is a monochasial sympod with a relay axis that follows Paul Champagnat's architectural model at the young stage and transitions to Wilhelm Troll's model later at the adult and old stage. We will try to confirm this in a future study on the architectural development of this species. This information contributes to the under-

standing of the functioning of the crown and the adaptation of this species to various environments. It could guide the choice of the ideal environment for the establishment of a reforestation or agroforestry programme based on *Parkia biglobosa*.

Acknowledgements

This study was financed by the Ministry of Higher Education and Scientific Research of Côte d'Ivoire, the French Development Agency and IRD (*Institut de Recherche pour le Développement*) in the framework of PRESeD-CI 2 (Renewed Partnership for Research for Development in Côte d'Ivoire) and C2D (Debt Reduction Contract) of the AMRUGE-CI project (Support for the Modernization and Reform of Universities and *Grandes Ecoles* of Côte d'Ivoire). The authors are grateful to the *Centre de Coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement* (CIRAD) for providing the technical equipment necessary to conduct the study.

Author's Declaration

Beda Innocent Adji wrote the article, took the experimental measurements and analyzed the data. Doffou Sélastique Akaffou and Sylvie Annabel Sabatier contributed to methodology development and corrected the article. Kouadio Henri Kouassi, Jérôme Duminil and Yao Patrice Houphouet coordinated the research project.

Data Availability

The datasets generated during and/or analyzed in the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Conflicts of Interest

The authors have no conflict of interest to declare.

References

- [1] Nicolini, E., Beauchêne, J., Leudet., De la Vallée, B., Ruelle, J., Mangenet, T. and Heuret, P. (2012) Dating Branch Growth Units in a Tropical Tree Using Morphological and Anatomical Markers: The Case of *Parkia velutina* Benoist (Mimosoïdeae). *Annals of Forest Science*, **69**, 543-555. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0172-1>
- [2] Sabatier, S., Caraglio, Y. and Drénou, C. (2014) L'architecture des arbres au service des forestiers. *Innovations Agronomiques*, **41**, 119-128.
- [3] Nicolini, E. and Caraglio, Y. (1994) L'influence de divers caractères architecturaux sur l'apparition de la fourche chez le *Fagus sylvatica*, en fonction de l'absence ou de la présence d'un couvert. *Canadian Journal of Botany*, **72**, 1723-1734. <https://doi.org/10.1139/b94-213>
- [4] Nicolini, E. (2000) Nouvelles observations sur la morphologie des unités de croissance du hêtre (*Fagus sylvatica* L.). Symétrie des pousses, reflet de la vigueur des arbres. *Canadian Journal of Botany*, **78**, 77-87. <https://doi.org/10.1139/cjb-78-1-77>

- [5] Reinhardt, D. and Kuhlemeier, C. (2002) Plant Architecture. *European Molecular Biology Organization (EMBO Reports)*, **3**, 846-851. <https://doi.org/10.1093/embo-reports/kvf177>
- [6] Barthélémy, D. and Caraglio, Y. (2007) Plant Architecture: A Dynamic, Multilevel and Comprehensive Approach to Plant Form, Structure and Ontogeny. *Annals of Botany*, **99**, 375-407. <https://doi.org/10.1093/aob/mcl260>
- [7] Rosati, A., Paoletti, A., Caporali, S. and Perri, E. (2013) The Role of Tree Architecture in Super High Density Olive Orchards. *Scientia Horticulturae*, **161**, 24-29. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.06.044>
- [8] Millan, M. (2016) Analyse de la variabilité des traits architecturaux des formes de croissance dans les communautés végétales. Thèse de Botanique. Université de Montpellier, Montpellier, 178 p.
- [9] Sina, S. (2006) Reproduction et Diversité Génétique chez *Parkia biglobosa* (Jacq.) G.Don. PhD Thesis, Wageningen University, Wageningen, 102 p.
- [10] Ouédraogo, A.S. (1995) *Parkia biglobosa* (Leguminosae) en Afrique de l'Ouest: Biosystématique et Amélioration. Thèse Doctorat Wageningen, University, Institute for Forestry and Nature Research, IBNDLO, 205p.
- [11] Maisharou, A. and Larwanou, M. (2015) Market Potential of Non-Wood Forest Products in the Sahelian Countries. *International Journal of Forestry Review*, **17**, 125-135. <https://doi.org/10.1505/146554815816007018>
- [12] Avana-Tientcheu, M.L.A., Keouna, S., Dongock, N.D. and Mouga, M.B. (2019) Structure des peuplements et potentiel de domestication de *Parkia biglobosa* dans la région de Tandjilé-Ouest (Tchad). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **13**, 219-236. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v13i1.19>
- [13] Détienne, P. (1995) Growth Ring Types and Occurrence in Some French Guianan Species. *Bois et Forêt des Tropiques*, **243**, 65-75.
- [14] N'dri, K.E., Gore, B.B.N. and Akaffou, D.S. (2019) Agro-Morphological Characterization of *Myrianthus Arboreus* (P. Beauv) in Cote d'Ivoire. *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*, **5**, 158-168. <https://doi.org/10.31695/IJASRE.2019.33450>
- [15] Louppe, D. and Ouattara, N. (1996) Les arboretums d'espèces locales en Nord Côte d'Ivoire. IDEFOR, 14 p. <http://agritrop.cirad.fr/581418>
- [16] Hérault, B., Anatole, K.N., N'klo, O., Assandé, A., Fabrice, B., Brahima, C., Doua-Bi, Y., Koffi, Y., Koffi, K.J.C., Konaté, I., Tiéoulé, F., Wourro, F., Zo-Bi, I.C. and Louppe, D. (2020) The Long-Term Performance of 35 Tree Species of Sudanian West Africa in Pure and Mixed Plantings. *Forest Ecology and Management*, **468**, 118171. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118171>
- [17] Djaha, J.B.A., N'da, A.A.A., Koffi, E.K., Ballo, C.K. and Coulibaly, M. (2012) Croissance et aptitude au greffage de deux génotypes d'anacardier (*Anacardium occidentale* L.) élites utilisées comme porte-greffe en Côte d'Ivoire. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **6**, 1453-1466. <http://ajol.info/index.php/ijbcs> <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v6i4.5>
- [18] Séka, K., Diallo, A.H., Kouassi, N.K. and Aké, S. (2009) Incidence du Yam mosaic virus (YMV) et du *Cucumber mosaic virus* (CMV) sur des variétés de *Dioscorea spp.* Cultivées dans les régions de Bouaké et de Toumodi en Côte d'Ivoire. *International Journal Biological Chem. Science*, **3**, 694-703. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v3i4.47179>
- [19] N'cho, B.S. (1991) Modélisation de l'accès des racines de maïs (*Zea mays*) à l'azote. Expérimentation au champ en Centre Côte d'Ivoire. Mémoire de DIAT-ESAT, Mont-

pellier, 22 p.

- [20] Ettien, D.J.B. (2004) Intensification de la production d'igname (*Dioscorea* spp) par la fertilisation minérale et l'identification de nouvelles variétés en zone forestière et savanicole de Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat unique en science de la terre, option Agro-pédologie, Université de Cocody, Abidjan, 187 p.
- [21] Akassimadou, G. and Yao, K. (2014) La variabilité climatique en Côte d'Ivoire: entre perception sociales et réponse agricole. *Cahier Agriculture*, **14**, 533-540.
- [22] Traoré, k., Sorho, F., Dramane, D.D. and Sylla, M. (2013) Adventices hôtes alternatifs de virus en culture de Solanaceae en Côte d'Ivoire. *Agro Africa*, **25**, 231-237.
- [23] N'zi, J.C., Kouame, C. and N'guetta, A.S.P. (2019) Influence de quelques paramètres climatiques sur les effectifs de *Bemisia tabaci* sur la tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **13**, 338-352. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v13i1.27>
- [24] Coulibaly, L., Kouassi, K.H., SORO, G.E and Savane, I. (2016) Analyse du processus de savanisation du nord de la Côte d'Ivoire par télédétection: Cas du département de Ferkessédougou. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, **17**, 136-143. <http://www.ijias.issr-journals.org/>
- [25] N'guessan, K.A., Diarassouba, N., Alui, K.A., Nangha, K.Y., Fofana, I.J. and Yao-Kouamé, A. (2015) Indicateurs de dégradation physique des sols dans le Nord de la Côte d'Ivoire: Cas de Boundiali et Ferkessédougou. *Afrique Science*, **11**, 115-128.
- [26] Coulibaly, T.J.H. (2009) Répartition spatiale, gestion et exploitation des eaux souterraines: cas du département de Katiola, région des savanes de Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Sciences de la Terre. Université Paris-Est, 142 p. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00638690>
- [27] Soro, T.D., Kouakou, B.D., Kouassi, E.A., Soro, G., Kouassi, A.M., Kouadio, K.E., Yéi, M.S.O. and Soro, N. (2013) Hydroclimatologie et dynamique de l'occupation du sol du bassin versant du Haut Bandama à Tortiya (Nord de la Côte d'Ivoire). *VertigO—La revue électronique en sciences de l'environnement*, **13**, 23 p. <https://doi.org/10.4000/vertigo.14468>
- [28] Adjanohoun, E. (1964) Végétation des savanes et des rochers découverts en Côte d'Ivoire Centrale. Rapport, Office de la recherche scientifique et technique outre-Mer, Centre ORSTOM d'Adiopodoumé-Abidjan, 238 p.
- [29] Hallé, F and Martin, R. (1968) Etude de la croissance rythmique chez l'Hévéa (*Hevea brasiliensis* Mull. Arg.). *Adansonia, Série 2*, **8**, 475-503.
- [30] Sabatier, S. (1999) Variabilité morphologique et architecturale de deux espèces de Noyers: *Juglans regia* L., *Juglans nigra* L. et deux Noyers hybrides interspécifiques. Thèse de Doctorat, Biologie végétale, sciences et techniques du Languedoc, Université de Montpellier II, 143 p. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00106305>
- [31] Sabatier, S. and Barthélémy, D. (1999) Growth Dynamics and Morphology of Annual Shoots According to Their Architectural Position in Young *Cedrus atlantica* (Endl.) Manetti ex Carrière (Pinaceae). *Annals of Botany*, **84**, 387-392. <https://doi.org/10.1006/anbo.1999.0939>
- [32] Thiébaud, B. (1982) Observations sur le développement de plantules de hêtre (*Fagus sylvatica*) cultivés en pépinières, orthotropie et plagiotropie. *Canadian Journal of Botany*, **60**, 1292-1303. <https://doi.org/10.1139/b82-165>
- [33] Hallé, F., Oldeman, R.A.A. and Tomlinson, P.B. (1978) Tropical Trees and Forests: An Architectural Analysis. Springer-Verlag, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-81190-6>
- [34] Hallé, F. and Keller, R. (2019) Mais d'où viennent les plantes? Actes sud., 179 p.

- [35] Sabatier, S., Barthélémy, D., Ducouso, I. and Germain, E. (1998) Modalités d'allongement et morphologie des pousses annuelles chez le noyer commun, *Juglans regia* L. 'Lara' (Juglandaceae). *Canadian Journal of Botany*, **76**, 1253-1264. <https://doi.org/10.1139/b98-055>
- [36] Godin, C. and Caraglio, Y. (1998) A Multiscale Model of Plant Topological Structures. *Journal of Theoretical Biology*, **191**, 1-46. <https://doi.org/10.1006/jtbi.1997.0561>
- [37] Taurines, M., Brancheriau, L., Palu, S., Pioch, D., Tardan, E., Boutahar, N., Sartre, P. and Meunier, F. (2019) Determination of Natural Rubber and Resin Content of Guayule Fresh Biomass by Near Infrared Spectroscopy. *Industrial Crop & Products*, **134**, 177-184. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.03.073>
- [38] Jaeger, M., Sabatier, S.A., De Reffye, P., Alsater, A.A. and Brancheriau, L. (2020) Efficient Stochastic Functional Structural Symptodial Shrubs Modelling Base Don-structural Hierarchy. Application to Guayule. FSPM 2020: Towards Computable Plants, Leibniz, Germany, hal-03105340.
- [39] Brancheriau, L., Sabatier, A.S., Jaeger, M., Hemery, N. and Mougani, C. (2020) Modelling the Guayule Plant Growth and Development with a Functional Structural Plant Model. FSPM towards Computable Plants. *9th International Conference on Functional-Structural Plant models*, Hanovre, hal-03056119.
- [40] Tousignant, M.E. and Delorme, M. (2006) Connaître le fonctionnement de la plante pour mieux gérer son environnement. Article paru dans Québec Vert (IQDHO). Adapté de Understanding Plant Growth: A Review of the Basics. Conférence présentée lors de l'Ohio International Short Course 2005 par Paul A. Thomas et Bodie V. Pennisi, de l'Université de Georgie, et bonifié par l'équipe de l'IQDHO, 3 p.
- [41] Abidi, F. (2012) Effets de la qualité de la lumière sur l'élaboration de l'architecture du rosier buisson. Thèse de doctorat, l'Université de Tunis El Manar, Tunisie, 277 p.
- [42] Calonne, A. (2013) Façonner l'architecture végétale pour contrôler les maladies des plantes. *BIOFUTUR*, **343**, 37-42.
- [43] Lauri, P.E., Kelner, J.J., Trottier, J.C. and Costes, E. (2010) Insights into Secondary Growth in Perennial Plants: Its Unequal Spatial and Temporal Dynamics in the Apple (*Malus domestica*) Is Driven by Architectural Position and Fruit Load. *Annals of Botany*, **105**, 607-616. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq006>
- [44] Maranz, S. and Wiesman, Z. (2003) Evidence for Indigenous Selection and Distribution of the Shea Tree, *Vitellaria paradoxa*, and Its Potential Significance to Prevailing Parkland Savanna Tree Patterns in Sub-Saharan Africa North of the Equator. *Journal of Global Biogeography*, **30**, 1505-1516. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2003.00892.x>
- [45] Soloviev, P., Niang, T.D., Gaye, A. and Totte, A. (2004) Variabilité des caractères physicochimiques des fruits de trois espèces ligneuses de cueillette, récoltés au Sénégal, *Adansonia digitata*, *Balanites aegyptiaca* et *Tamarindus indica*. *Fruits*, **59**, 109-119. <https://doi.org/10.1051/fruits:2004011>
- [46] Salazar, R. and Quesada, M. (1987) Provenance Variation in *Guazuma ulmifolia* L. in Costa Rica. *Commonwealth Forestry Review*, **66**, 317-324.
- [47] Assogbadjo, A.E., Sinsin, B., Codjia, J.T.C. and Van Damme, P. (2005) Ecological Diversity and Pulp, Seed and Kernel Production of the Baobab (*Adansonia digitata*) in Benin. *Belgian Journal of Botany*, **138**, 47-56.
- [48] Assogbadjo, A.E., Kyndt, T., Sinsin, B., Gheysen, G. and Van Damme, P. (2006) Patterns of Genetic and Morphometric Diversity in Baobab (*Adansonia digitata* L.) Populations across Different Climatic Zones of Benin (West Africa). *Annals of Botany*, **97**, 819-830. <https://doi.org/10.1093/aob/mcl043>

- [49] Meridja, S. (2011) Approche biophysique des processus de développement et de croissance des couverts végétaux: Interaction avec le stress hydrique et optimisation des pratiques culturales en climat méditerranéen. Thèse en Sciences agricoles, AgroParisTech, Français, NNT: 2011AGPT0057, pastel-00776775, 180 p.

PUBLICATION 3

Beda Innocent Adji, Doffou Sélastique Akaffou, Kouadio Henri Kouassi, Yao Patrice Houphouet, Jérôme Duminil and Sylvie Sabatier. **2021**.

BIOCLIMATE INFLUENCE ON SEED GERMINATION AND SEEDLING MORPHOLOGY PARAMETERS IN *PTEROCARPUS ERINACEUS* POIR., 1804 (FABACEAE). *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 6(3), pp. 1-15, ISSN 2456-1878. <https://dx.doi.org/10.22161/ijeab.63.1>



HAL
open science

Bioclimate influence on seed germination and seedling morphology parameters in *Pterocarpus erinaceus* Poir., 1804 (Fabaceae)

Beda Innocent Adji, Sélastique Doffou Akaffou, Kouadio Henri Kouassi, yao Patrice Houphouet, Jérôme Duminil, Sylvie-Annabel Sabatier

► To cite this version:

Beda Innocent Adji, Sélastique Doffou Akaffou, Kouadio Henri Kouassi, yao Patrice Houphouet, Jérôme Duminil, et al.. Bioclimate influence on seed germination and seedling morphology parameters in *Pterocarpus erinaceus* Poir., 1804 (Fabaceae). *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, Infogain Publication, 2021, 6 (3), pp.001-015. 10.22161/ijeab . hal-03227802

HAL Id: hal-03227802

<https://hal.inrae.fr/hal-03227802>

Submitted on 29 Jul 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution| 4.0 International License



Bioclimate influence on seed germination and seedling morphology parameters in *Pterocarpus erinaceus* Poir., 1804 (Fabaceae)

Beda Innocent Adji^{1,2*}, Doffou Sélastique Akaffou¹, Kouadio Henri Kouassi¹, Yao Patrice Houphouet¹, Jérôme Duminil³, Sylvie Annabel Sabatier²

¹Université Jean Lorougnon Guédé, Agroforestry UFR, BP 150, Daloa, Côte d'Ivoire

²CIRAD, UMR AMAP, F-34398 Montpellier, France ; AMAP, Université Montpellier, CIRAD, CNRS, INRA, IRD, Montpellier, France

³IRD, UMR-DIADE, Montpellier Cedex 5, France ; DIADE, Université Montpellier, CIRAD, IRD, Montpellier, France

*Corresponding Author: adjibedainnocent@gmail.com/beda-innocent.adji@cirad.fr

Received: 01 Feb 2021; Received in revised form: 20 Mar 2021; Accepted: 19 Apr 2021; Available online: 09 May 2021

©2021 The Author(s). Published by Infogain Publication. This is an open access article under the CC BY license

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract— *Pterocarpus erinaceus* is over-exploited for its multiple uses. Its exploitation and trade are strictly prohibited in many countries, including Côte d'Ivoire, to prevent its extinction. It is nevertheless imperative to restore populations of this species, while accounting for its germinative capacities and its adaptation to changing climates. The aim of this study was to assess the seed germination and seedling development in *Pterocarpus erinaceus* in three different environments. A total of 2,160 seeds from different seed trees and 540 individuals germinated from seeds were selected and evaluated. The trials were conducted at three sites with distinct microclimates (two nurseries in Côte d'Ivoire and one greenhouse in France). The results showed that the environment had a significant influence on germination parameters ($P < 0.05$), whereas the seed trees did not ($P > 0.05$). The environment influenced the height and internodes length of the seedlings ($P < 0.05$). However, the diameter, number of leaves, and the length and width of the leaves of the seedlings were statistically identical from one site to another ($P > 0.05$). Seed trees influenced the number and length of seedlings leaves ($P < 0.05$). PCA showed that the seedlings developed better in the Montpellier greenhouse and at the Daloa site than Korhogo site. This information could guide the choice of ideal environments for the implementation of reforestation or agroforestry programs based on *Pterocarpus erinaceus* in the current context of climate change from a nursery. This study could be extended to other species in order to regenerate important species in disturbed ecosystems.

Keywords— *Pterocarpus erinaceus*, nurseries, greenhouse, environment, germination and seedling morphology, Côte d'Ivoire.

I. INTRODUCTION

Plant genetic resources, a component of biodiversity, the biological basis of the planet's environmental equilibrium, and a source of economic and ecological security for the future, provide the basis for sustainable development (Houndonougbo et al. 2020; Choat et al. 2012; United Nation 2002). Today, this biodiversity is threatened by overexploitation, yet the survival of all humanity depends on it. In 1992 in Rio de Janeiro, the United Nations adopted the following authoritative but not legally binding declaration: "Forest resources and woodlands should be

managed on a sustainable basis in order to meet the social, economic, ecological, cultural and spiritual needs of present and future generations". These needs relate to the products and services that the forest can provide such as wood and wood-based products, water, food, fodder, medicinal products, fuel, shelter, employment, recreation, wildlife habitat, a source of diversity in the landscape, the role of a carbon sink and reservoir, and many other products from the forest. Appropriate measures should be taken to protect forests from the damaging effects (Leroy 2015).

In Africa, forest degradation is intensifying because the principles of sustainable forest management are being ignored (Rabiou et al. 2015; Dipelet et al. 2019). Targeted and selective exploitation of certain important forest species severely threatens the forest ecosystems of many West African countries (Segla et al. 2016, 2020; Mbowa et al. 2013). To respond effectively to the current environmental emergency, sustainable forest management must therefore become an integral part of farmers' usual agricultural practices. Regenerating the forest and/or reconciling forest with modern agriculture by associating important forest tree species (leguminous, food, fodder, and medicinal species) with crops is a choice and a major challenge that many African countries including Côte d'Ivoire want to take up (Reed + 2017).

Generally, trees are markers of the identity of the rural populations that use them in West Africa (Mabetty 2018). Among these trees, *Pterocarpus erinaceus*, Poir (1804) from Fabaceae family called veneer wood « bois de vène » or Senegal rosewood is a spontaneous, forest fire-resistant, nitrogen-fixing CITES species and is native to fragile semi-arid habitats (CITES 2016; Anonymous 2016; Dumenu 2019). She originates from the Guinean-Sudanian and Sudano-Sahelian zones of West Africa and is highly overexploited for its multiple uses (quality timber, fodder, medicine, dyeing, soil restoration, etc.) (Ouedraogo et al. 2006; Rabiou et al. 2019; Goba et al. 2019; Segla et al. 2020). Indeed, recent years have been characterized by a spectacular increase in the trade of *Pterocarpus erinaceus*. This increase responds on the one hand to the growing demand for rosewood furniture in Asia, and on the other hand to the increasing scarcity of other species officially recognized as "rosewood" (several are listed in the CITES Appendices). It is estimated that exports of *Pterocarpus erinaceus* as logs to China increased by a factor of 2,000 between the third quarter of 2009 and the third quarter of 2015, from 70 m³ to over 149,000 m³ (Cop 17 2016). Widespread illegal and unsustainable exploitation of the species within its range has led many States of West Africa (i.e. Burkina Faso, Benin, Togo, Niger, Côte d'Ivoire) to enact total bans on harvesting and trade in the species in recent years, with the aim of preventing its extinction.

In Côte d'Ivoire, the exploitation of *Pterocarpus erinaceus* is prohibited by decree n° 2013-508 of 25 July 2013 (MINEF 2013). Despite these measures, its trade continues to grow steadily so that *Pterocarpus erinaceus* stands are almost non-existent in Côte d'Ivoire today. Given the importance of this species and faced with this problem, which could lead to a loss of diversity that could lead to its

extinction in Côte d'Ivoire, there is an urgent need to develop strategies for the rapid regeneration of this species.

Among several rapid regeneration solutions, domestication through germination tests has proved to be very effective in saving pioneer species that are threatened or overexploited in many countries (Amani et al. 2015; Douma et al. 2019; Adji et al. 2020). However, in the current context of climate change for the domestication of *Pterocarpus erinaceus*, several questions arise: (i) could the ever-changing environment have an effect on seed germination? (ii) are the dendrometric characteristics of the seed tree (ideal choice of seed trees) necessary to obtain a good germination rate? (iii) is the choice of vigorous seedlings resistant to climatic stress necessary? (iv) do seedlings of this species adapt to different types of environment? (v) is seedling development influenced by the type of seed tree? (vi) could the germination or morphology parameters of the seedlings guide the choice of an environment conducive to the implementation of a forest or agroforestry management programme? etc. This study was carried out with the aim of trying to answer all these questions. The objective is to evaluate the germination of seeds and the development of *Pterocarpus erinaceus* seedlings in a changing environment.

II. MATERIAL AND METHODS

2.1. Plant material

The plant material is composed of seeds obtained after shelling of mature fruits, from six seed trees growing more than 300 m apart in the same stand of *Pterocarpus erinaceus* and four-months old seedlings resulting from the germination of seeds collected under the six seed trees. All the seeds were collected from trees in good physiological condition in April 2019 at the experimental station (DeFo) of the CNRA (*Centre National de Recherche Agronomique*) in the Korhogo department of Côte d'Ivoire. The characteristics of the seed trees are listed in Table 1. The plant material used is the property of the CNRA of Côte d'Ivoire and the authorisation to use this plant material was given to us in the framework of this study via a partnership agreement signed and available on request between the said structure and our study project (EFISA). The formal identification of the species was undertaken by Poir in 1804 (Encycl.5 728.1804) (Anonymous 2019). A specimen of this material exists in the public herbarium (N°UCJ010935) of the CSRS (*Centre Suisse de Recherches Scientifiques*) in Côte d'Ivoire (Bakayoko et al. 2020) and the CNF (*Centre National de Floristique*) in Côte d'Ivoire (Koffi et al. 2018).

Table 1 Characteristics of *Pterocarpus erinaceus* seed trees and seeds used

Seed trees	DBH (cm)	H (m)	Age (year)	GPS coordinates		Number of seeds	Seed mass (g)		
				Longitude	Latitude		Mini	Maxi	Mean
1	24.36	15	23	-5.55112 W	9.5681 N	360	0.02	0.1	0.07 ± 0.01 a
2	32.32	18.5	26	-5.55119 W	9.56797 N	360	0.06	0.1	0.08 ± 0.01 a
3	31.05	18	26	-5.55134 W	9.56779 N	360	0.04	0.08	0.07 ± 0.01 a
4	26.11	15.5	22	-5.55122 W	9.56785 N	360	0.04	0.1	0.07 ± 0.01 a
5	29.78	16.5	25	-5.55132 W	9.56781 N	360	0.05	0.1	0.07 ± 0.01 a
6	23.88	16.5	25	-5.55131 W	9.56808 N	360	0.02	0.1	0.07 ± 0.02 a
Pr > F									0.851

DBH = Diameter at chest height in centimetres; **H** = Height in metres; **W** = West; **N** = North; **Mini** = Minimum in grams; **Maxi** = Maximum in grams

2.2. Methods

2.2.1. Study sites

The trials were implemented April to September 2019 in three sites, two in Côte d'Ivoire and one in France with different microclimates. Of the two sites in Côte d'Ivoire, one was at the CNRA forest experimental station (hereafter DeFo) in Korhogo, and the other at the *Université Jean*

Lorougnon Guédé (hereafter UJLoG), in Daloa. The trial in France took place in a controlled environment, in Greenhouse 8 at CIRAD (The French agricultural research and international cooperation organization working for the sustainable development of tropical and Mediterranean regions) in Montpellier. The characteristics of the study sites are listed in Table 2.

Table 2 Geographical location and characteristics of study sites (Guillaumet and Adjanohoun 1971; Perraud 1971; Loupe and Ouattara 1996; Bornand et al. 1999; FAO 2005; Goula et al. 2007; Soro 2011; Djaha et al. 2012; Millan 2016; Barry et al. 2018; AISA 2019; Anonymous 2019; Hérault et al. 2020).

Study sites or Bioclimates	Coordinates	Vegetation	Climate	Temperature	Rainfall (mm/year)	Soil type
Korhogo (DeFo)	9°570'80556''N 5°542'88889''W	Clear forest (wooded and grassy savannah)	Tropical dry	26.6 – 35.7 °C	817 - 1216	Ferruginous (90%) and Ferralitic (10%) superficial gravelly soil, deep gravel with a heavy texture, low in organic matter, highly desaturated.
Daloa (UJLoG)	6° 909'6363''N 6°438'1157''W	Dense rain forest	Wet tropical (sub-equatorial)	21 – 34 °C	1000 - 1900	Ferralitic, deep, acidic and desaturated in exchangeable bases, rich in organic matter
Montpellier (Greenhouse e)	43°64981'N 3°86842'W	in the greenhouse	in the greenhouse	24 °C (night) - 32 °C (day)	10 cm ³ per week for each pot	Mixture of Substrate Soil 1, Neuhaus N2 Bio, Tref Rice CIRAD 2 and extra-silica sand from <u>bio</u>

W = West; **N** = North; **°C** = degrees Celsius; **mm** = millimetre; **Substrate 1** = Iron, trace elements, perlite and coconut fibre; **Neuhaus N2 Bio** = vegetable co-composting, blond and black peat; **Tref Rice CIRAD 2** = clay, volcanic sand, perlite no. 2, coconut, Irish white peat and fine blond peat

2.2.2. Setting up the tests

Seed harvesting

Mature fruits were harvested in April and May 2019 on the seed trees using long wooden sticks with forks attached or by knocking the top of the tree with stones. The mature fruit collected under each seed tree was husked by hand to remove the thorny shells from the seeds. The seeds were then divided into three batches. Each batch contained seeds from all six seed trees (seed trees), i.e. 120 healthy seeds were selected per seed tree and per study site after sorting all the seeds collected (120 seeds x 6 seed trees x 3 test sites giving a total of 2,160 seeds of *Pterocarpus erinaceus*).

2.2.3. Test preparation and apparatus

Site 1 and 2: Korhogo and Daloa Nursery

Polyethylene black bags with drainage holes measuring 20 x 10 cm were filled with local soil and arranged in one block comprising six sub-blocks. Each sub-block was labelled with the seed tree's serial number and geographic coordinates and contained seeds harvested on and under one seed tree. Each sub-block contained 60 bags of soil prepared to receive two seeds each. The seeds from each seed tree were soaked in water for 12 hours to break seed dormancy and then sowed directly at a depth of approximately 2 cm in the bags at a rate of two seeds per bag. Before planting, the seeds were treated with granulated FURADAN to control rodents and after seedling emergence, the pre-leaves were treated with DECIS to limit insects' attacks. Nursery maintenance consisted of daily watering and manual weeding.

Site 3: Greenhouse at CIRAD, Montpellier

Polyester black pots with drainage holes measuring 30 x 15 cm were filled with a mixture of potting compost as specified above (Table 2). The pots were arranged in labelled blocks and sub-blocks in metal bins arranged in the same way as in Korhogo and Daloa. The seeds were sown in the same way as those from the other two sites in Côte d'Ivoire. Biological protection consisted of treatment with BIOBEST against greenhouse whiteflies. The pots were watered daily (10 cm³ per week). all the pots occupied an area of about 12 m².

2.2.4. Data Collection

Germination parameters

Five parameters were evaluated:

- Latency time, i.e. the time it takes for the first seed to germinate from the sowing of all the seeds (Amani et al. 2015);
- Germination delay refers to the period between the sowing of each seed and the appearance of each seedling (N'golo et al. 2018);

- Germination speed, i.e. the average time after which 50% of the seeds have germinated (Berka and Abdelkader 2001; Diatta et al. 2009; Douma et al. 2019);

- Germination duration or Spread time, i.e. is the period between germination of the first seed and the last seed (Adji et al. 2020);

- Germination rate, i.e. the number of seeds sprouted divided by the number of total seeds sprouted, expressed as a percentage (Zerbo et al. 2010; Gorgon et al. 2015; Akaffou et al. 2019).

Development parameters

Six parameters were evaluated (Adji et al. 2020):

- Seedling height (SH), i.e. the length between the collar and the apex of the seedling;

- Diameter at the collar of seedling (Dcol), i.e. the base thickness of the main stem of the seedling;

- Number of leaves (LN°) corresponds to the number of leaves on the main stem of the seedling;

- Leaf length (LL) corresponds to the length from the beginning of the petiole to the end of the main vein of the leaf blade of each leaf present on the main stem of the seedling;

- Leaf width (LW) corresponds to the width of the leaf blade or to the line perpendicular to the main vein in the centre of the leaf blade;

- Length of the internodes (LIN), i.e. the length connecting two nodes or the length of two points of successive insertions of organs or leaf scars, from the base to the apex of the seedling.

All morphological parameters were measured using a ruler graduated in centimeters and an electronic caliper in millimeters.

2.2.5. Data analysis

Statistical analyses were first performed using one-dimensional descriptive statistics, link analysis (linear regression, correlation and covariance) and multidimensional analysis (principal component analysis, PCA) with XLSTAT 2020 version 7.5. The difference between the germination and development parameters was assessed using a two-factor multivariate analysis (MANOVA) with SAS software version 9.4. The Student-Newman-Keuls test at the 5% threshold was used for post-hoc comparisons.

III. RESULTS

Pterocarpus erinaceus is epigerminated with a hypocotyl remaining in the soil, the epicotyl is on average 8.74 cm long and 1.8 mm in diameter at the base (at an of average 9

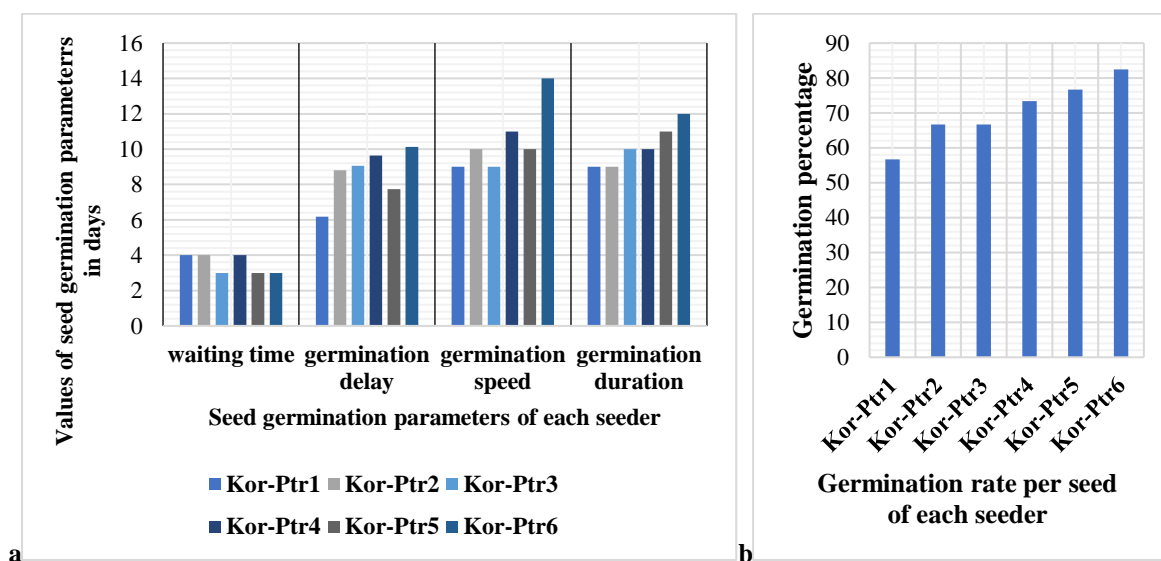
days after sowing). The pre-leaves (at an average 10 days after sowing) have a long petiole in the same direction as the stem with two (2) stipules each at the base of the leaf sheath. The cotyledonary leaves remain visible for an average of 58 days. The phyllotaxis is alternate spiral with simple leaves with stipules until an average of 84 days, after which the seedling develops compound- imparipinnate and then compound-paripinnate leaves later (100 days on average). Branching appears on a few seedlings after the appearance of compound leaves (average 118 days).

3.1. Germination and development parameters by each study site

3.1.1. Germination parameters

Site 1: Korhogo

At the Korhogo site, the shortest germination latency was three days and was obtained with the seeds of seed trees 3, 5 and 6 (Fig 1a). The shortest germination delay ranged from four to 13 days to 6.17 ± 2.249 days, they were recorded in the seeds of seed tree 1 (Fig 1a). The seeds of seed trees 1 and 3 showed the fastest speed after nine days (Fig 1a). The shortest germination time was observed in the seeds of seed trees 1 and 2 with a duration of nine days (Fig 1a). The seeds of seed tree 6 had the highest germination rate with a rate of 86.66% (Fig 1b).



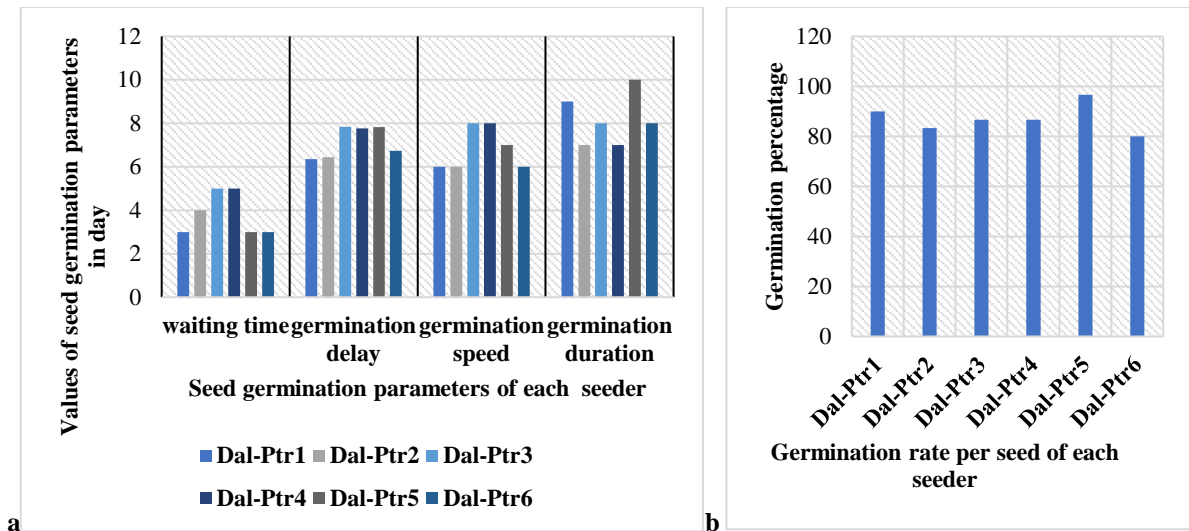
Kor-Ptr1=Seeds from seed tree 1, **Kor-Ptr2**=Seeds from seed tree 2, **Kor-Ptr3**=Seeds from seed tree 3, **Kor-Ptr4**=Seeds from seed tree 4, **Kor-Ptr5**=Seeds from seed tree 5, **Kor-Ptr6**=Seeds from seed tree 6

Fig 1. Distribution of seed germination parameters (a: Waiting time, germination delay, germination speed and germination duration; b: germination rate) of the six seed trees in Korhogo nursery

Site 2: Daloa

At Daloa site, the seeds of seed trees 1, 5 and 6 were characterized by short latencies, i.e., a period of three days (Fig 2a). The germination delays of the seeds of seed tree 1 were minimal ranging, from three to 12 days with an average of 6.357 ± 1.985 days (Fig 2a). The seeds of seed

trees 1 and 2 had the highest germination rate after six days (Fig 2a). The range of germination was smaller in the seeds of seed trees 2, 4 and 5 at 7 days (Fig 2a). Seeds of seed tree 5 had the highest germination rate at 96.66% (Fig 2b).



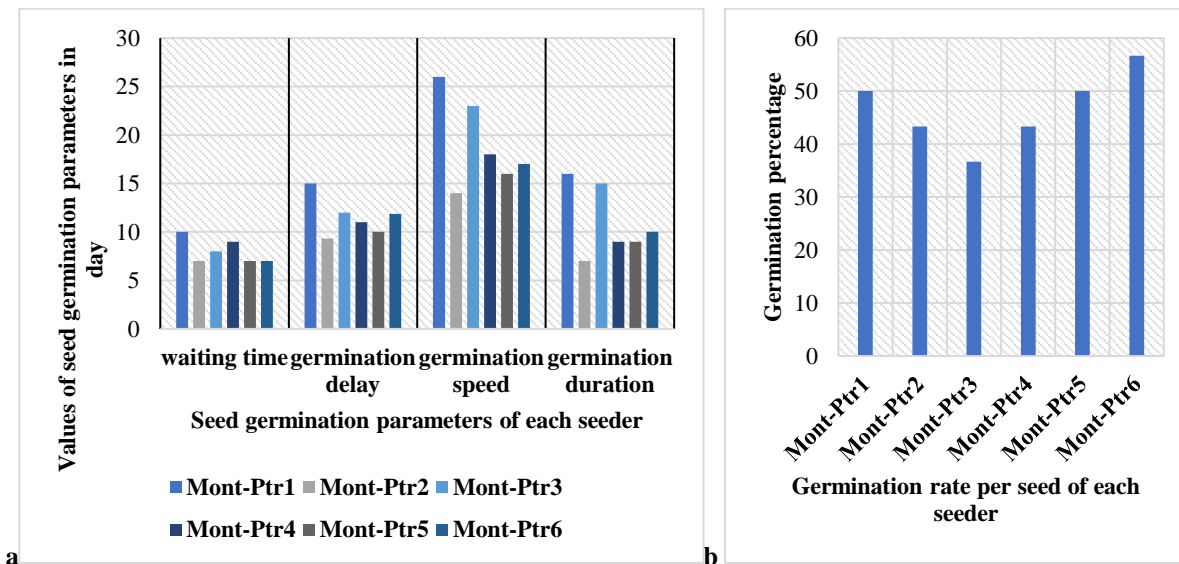
Dal-Ptr1=Seeds from seed tree 1, **Dal-Ptr2**=Seeds from seed tree 2, **Dal-Ptr3**=Seeds from seed tree 3, **Dal-Ptr4**=Seeds from seed tree 4, **Dal-Ptr5**=Seeds from seed tree 5, **Dal-Ptr6**=Seeds from seed tree 6

Fig 2. Distribution of seed germination parameters (a: Waiting time, germination delay, germination speed and germination duration; b: germination rate) of the six seed trees in Daloa nursery

Site 3: Montpellier greenhouse

In the CIRAD greenhouse (controlled environment), the shortest germination latency was seven days and was obtained with the seeds from seed trees 2, 5 and 6 (Fig 3a). The shortest germination delay ranged from seven to 14 days, average 9.33 ± 2.658 days, with the seeds of seed tree

2 (Fig 3a). The seeds of seed tree 2 were also the fastest after 14 days. The shortest germination duration (six days) was observed in the seeds of seed tree 1 with a duration of six days (Fig 3a). The seeds of seed tree 6 had the highest germination rate with a rate of 56.66% (Fig 3b).



Mont-Ptr1=Seeds from seed tree 1, **Mont-Ptr2**=Seeds from seed tree 2, **Mont-Ptr3**=Seeds from seed tree 3, **Mont-Ptr4**=Seeds from seed tree 4, **Mont-Ptr5**=Seeds from seed tree 5, **Mont-Ptr6**=Seeds from seed tree 6

Fig 3. Distribution of seed germination parameters (a: Waiting time, germination delay, germination speed and germination duration; b: germination rate) of six seed trees in Montpellier greenhouse

3.1.2. Development parameters

Comparison of morphological characteristics of the seedlings from each seed tree in Korhogo site (Table 3) showed that all the seedlings from all the seed trees combined had identical collar diameters ($P > 0.05$). In contrast, the height, number of leaves, length of leaves, width of leaves and length of internodes all differed significantly ($P < 0.05$).

At the Daloa site, comparison of morphological characteristics of seedlings from seed trees (Table 3) showed statistically significant variability of variables

among the seed trees' seedlings. Height, number of leaves, the length and width of seedling leaves ($P < 0.05$). The variables collar diameter and internode length were statistically identical from one seedling to another ($P > 0.05$).

Comparison of morphological characteristics of the seedlings from each seed tree in Montpellier greenhouse (Table 3) showed that all the morphological characteristics of seedlings grown from each seed tree and observed in the Montpellier site differed from each other ($P < 0.05$).

Table 3 Comparison of morphological characteristics of seedlings according to the seed trees used per study site

Sites	Seed trees	SH (cm)	Dcol (mm)	N°L	LL (cm)	LW (cm)	LIN (cm)
Korhogo	Seed tree-1	11.34±1.24 ab	1.98±0.21 a	5.6±0.44 b	5.87±0.34 a	5.74±0.61 a	1.61±0.51 b
	Seed tree-2	9.7±1.36 b	2.04±0.51 a	6.31±0.41 ab	6.21±0.56 a	6.02±0.31 a	2.06±0.14 a
	Seed tree-3	12.6±0.74 ab	2.06±0.34 a	7.54±0.53 a	5.37±0.47 ab	5.2±0.22 ab	2.41±0.16 a
	Seed tree-4	15.74±1.51 a	2.62±0.42 a	6.31±0.53 ab	5.64±0.47 ab	5.08±0.34 ab	1.86±0.23 b
	Seed tree-5	12.63±1.47 ab	2.31±0.13 a	7.51±0.62 a	4.62±0.53 b	4.12±0.25 b	2.19±0.24 a
	Seed tree-6	10.63±1.71 b	2.58±0.26 a	5.1±0.33 b	4.23±0.72 b	3.8±0.62 b	1.57±0.06 b
	Pr > F	0.0001	0.652	0.001	0.0071	0.0311	0.0114
Daloa	Seed tree-1	16.38±1.21 ab	2.05±0.25 a	5.4±0.71 b	4.7±0.17 ab	3.98±0.22 b	2.8±0.10 a
	Seed tree-2	14.12±1.11 ab	2.64±0.23 a	7.6±0.62 ab	5.8±0.27 a	5.1±0.41 a	3.8±0.13 a
	Seed tree-3	13.5±1.53 b	2.67±0.32 a	7.58±0.42 ab	5.56±0.31 a	4.54±0.42 ab	3.2±0.21 a
	Seed tree-4	14.57±1.41 ab	2.33±0.22 a	5.65±0.34 b	4.78±0.32 ab	3.68±0.34 b	2.4±0.11 a
	Seed tree-5	18.29±0.84 a	2.71±0.14 a	8.54±0.36 a	5.62±0.12 a	5.55±0.61 a	3.7±0.51 a
	Seed tree-6	16.62±1.35 ab	2.63±0.34 a	7.21±0.44 ab	3.8±0.51 b	3.9±0.31 b	3±0.21 a
	Pr > F	0.041	0.812	0.011	0.0221	0.001	0.921
Montpellier (Greenhouse)	Seed tree-1	14.65±1.22 b	2.95±0.36 a	6.7±0.39 ab	5.24±0.52 a	5.8±0.34 a	3.1±0.41 ab
	Seed tree-2	16.07±1.34 ab	1.55±0.43 b	7.6±0.53 ab	4.79±0.34 ab	4.3±0.41 ab	3.61±0.16 ab
	Seed tree-3	18.7±1.52 a	2.61±0.34 a	7.4±0.47 ab	5.8±0.22 a	5.7±0.16 a	4.31±0.31 ab
	Seed tree-4	16.77±1.37 ab	2.31±0.12 a	5.97±0.63 b	4.31±0.34 ab	3.5±0.24 b	2.34±0.25 b
	Seed tree-5	16.42±1.43 ab	2.92±0.15 a	8.3±0.46 a	4.53±0.51 ab	4.36±0.21 ab	3.42±0.17 ab
	Seed tree-6	15.2±1.65 ab	2.87±0.12 a	6.96±0.26 ab	3.97±0.13 b	3.82±0.34 b	5.08±0.37 a
	Pr > F	0.001	0.04991	0.0001	0.001	0.001	0.0001

For each character, values with the same letters are not statistically different at the 5% threshold.

SH: seedling height; **Dcol:** Diameter at the collar of the seedlings; **N°L:** Number of leaves; **LL:** Leaf length; **LW:** Leaf Width; **LIN:** Length of the internodes; **cm:** centimetres; **mm:** millimetres.

3.2. Global influence of study sites and seed trees on seed germination and seedling development in *Pterocarpus erinaceus*

3.2.1. Influence on seeds germination

Figure 4 is an overview of all germination parameters observed at the three study sites. She indicates that the highest germination rate was measured at the Daloa site. However, the highest values for the four other parameters

(waiting time, germination delay, germination speed and germination spread time) were recorded in Montpellier greenhouse.

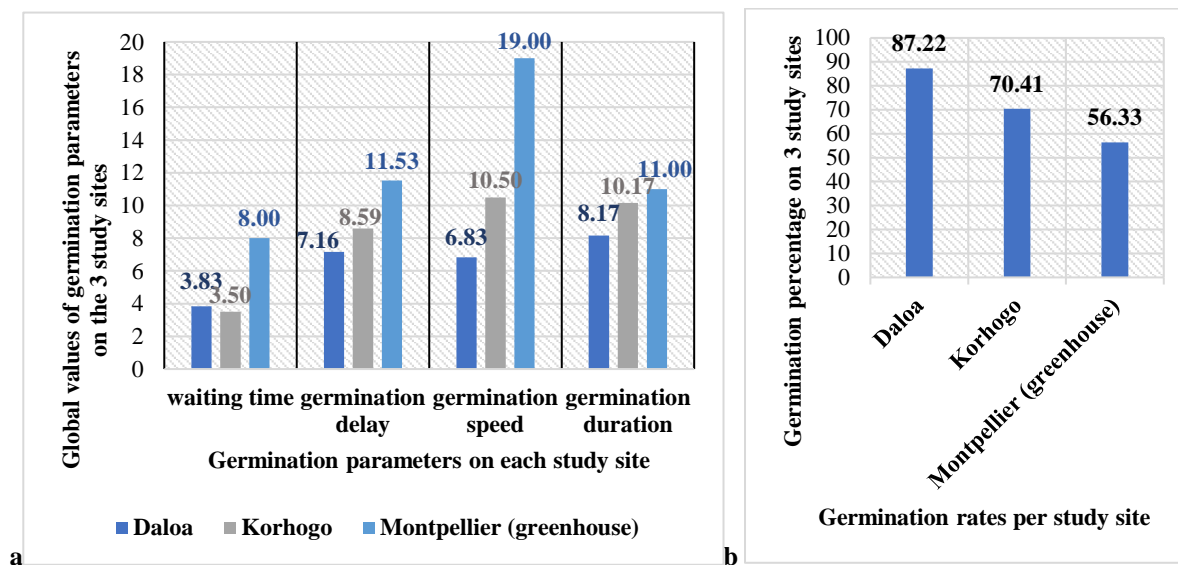


Fig 4. Global distribution of each germination parameter (a: Waiting time, germination delay, germination speed and germination duration; b: germination rate) for the all study sites.

According to Table 4, all germination parameters differed statistically ($P < 0.05$) from site to site, except for germination spread, which is identical from site to site ($P > 0.05$). The analysis of variance (Table 4) of germination

parameters according to the types of seed trees used showed that all observed variables were statistically identical from one seed tree to another ($P > 0.05$) for all three sites.

Table 4 Comparison of germination parameters according to the bioclimates and seed trees used

Sites or bioclimates/Seed trees	waiting time	germination delay	germination speed	germination duration	germination rate
Korhogo	3.50 ± 0.22 b	8.59 ± 0.58 b	10.50 ± 0.76 b	10.17 ± 0.48 a	70.41 ± 3.70 b
Daloa	3.83 ± 0.40 b	7.16 ± 0.29 b	6.83 ± 0.40 c	8.17 ± 0.47 a	87.22 ± 2.34 a
Montpellier (Greenhouse)	8 ± 0.52 a	11.53 ± 0.81 a	19 ± 1.86 a	11 ± 1.48 a	56.33 ± 3.36 c
Pr > F	0.0001	0.0004	0.001	0.1251	0.0001
Seed tree-1	5.67 ± 2.18 a	9.18 ± 2.91 a	13.67 ± 6.23 a	11.33 ± 2.33 a	65.55 ± 12.37 a
Seed tree-2	5 ± 1 a	8.19 ± 0.89 a	10 ± 2.31 a	7.67 ± 0.66 a	66.66 ± 9.62 a
Seed tree-3	5.33 ± 1.45 a	9.63 ± 1.23 a	13.33 ± 4.84 a	11 ± 2.08 a	67.77 ± 10.59 a
Seed tree-4	6 ± 1.53 a	9.47 ± 0.94 a	12.33 ± 2.96 a	8.67 ± 0.88 a	71.99 ± 8.87 a
Seed tree-5	4.33 ± 1.33 a	8.52 ± 0.74 a	11 ± 2.65 a	10 ± 0.58 a	78.44 ± 10.05 a
Seed tree-6	4.33 ± 1.33 a	9.57 ± 1.50 a	12.33 ± 3.28 a	10 ± 1.15 a	77.50 ± 3.82 a
Pr > F	0.9534	0.9762	0.9843	0.5011	0.8784

For each character, values with the same letters are not statistically different at the 5% threshold.

Table 5 shows a strong positive correlation between first germination and germination delay and then

germination speed at all three study sites: between germination delay and germination speed and then

germination duration and between germination speed and germination time. However, this matrix indicated a negative

correlation between germination rate and waiting time, germination delay and germination speed.

Table 5 Total correlation matrix (Pearson) between germination parameters

Variables	Waiting time	Germination delay	Germination speed	Germination duration	Germination rate
Waiting time	1				
Germination delay	0.796	1			
Germination speed	0.870	0.943	1		
Germination duration	0.396	0.733	0.746	1	
Germination rate	-0.720	-0.609	-0.747	-0.393	1

Values in bold are different from 0 at significance level alpha=0.05

3.2.2. Influence on seedling development

The results (Table 6) showed that only the heights and lengths of the internodes differed from one bioclimate to another ($P < 0.05$). The collar diameter, number of leaves, the length and width of the leaves were the same from one bioclimate to another ($P > 0.05$).

Analysis of variance of the seedlings from one seed tree to another at all three sites (Table 6) indicated that only the number of seedling leaves and leaf length differed significantly in seedlings from one seed tree to another ($P < 0.05$). Height, diameter, leaf width and successive internode lengths of seedlings were all statistically identical from one seedling to another ($P > 0.05$).

Table 6 Comparison of morphological parameters according to the bioclimates and seed trees used

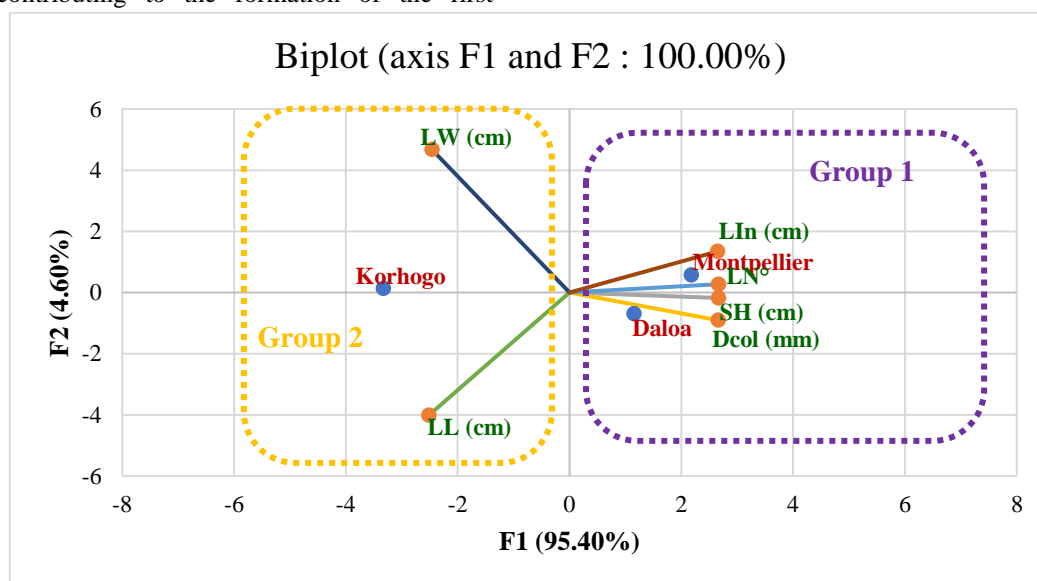
Sites or bioclimates/Seed trees	SH (cm)	Dcol (mm)	N°L	LL (cm)	LW (cm)	LIN (cm)
Daloa	15.58±0.74 a	2.50±0.11 a	6.99±0.49 a	5.04±0.31 a	4.46±0.30 a	3.15±0.22 a
Korhogo	12.11±0.86 b	2.26±0.12 a	6.39±0.40 a	5.32±0.31 a	4.99±0.36 a	1.95±0.14 b
Montpellier (Greenhouse)	16.30±0.58 a	2.53±0.22 a	7.15±0.33 a	4.77±0.27 a	4.58±0.39 a	3.64±0.39 a
Pr > F	0.0024	0.4292	0.4168	0.4455	0.5456	0.0014
Seed tree-1	14.12±1.48 a	2.33±0.31 a	5.90±0.40 b	5.27±0.34 ab	5.17±0.59 a	2.50±0.45 a
Seed tree-2	13.29±1.88 a	2.08±0.31 a	7.17±0.43 ab	5.60±0.42 a	5.14±0.49 a	3.16±0.55 a
Seed tree-3	14.93±1.90 a	2.45±0.19 a	7.51±0.05 ab	5.58±0.12 a	5.15±0.34 a	3.31±0.55 a
Seed tree-4	15.69±0.64 a	2.42±0.10 a	5.98±0.19 b	4.91±0.39 ab	4.09±0.49 a	2.20±0.17 a
Seed tree-5	15.78±1.66 a	2.65±0.18 a	8.12±0.31 a	4.92±0.35 ab	4.68±0.44 a	3.10±0.46 a
Seed tree-6	14.15±1.81 a	2.69±0.09 a	6.42±0.66 b	4±0.13 b	3.84±0.03 a	3.22±1.02 a
Pr > F	0.8629	0.4272	0.0094	0.0335	0.1900	0.7129

For each character, values with the same letters are not statistically different at the 5% threshold.

SH: seedling height; **Dcol:** Diameter at the collar of the seedlings; **N°L:** Number of leaves; **LL:** Leaf length; **LW:** Leaf Width; **LIN:** Length of the internodes; **cm:** centimetres; **mm:** millimetres.

Figure 5 shows the projection of bioclimates and morphological parameters for all seedlings on PCA 1-2 (biplot). Analysis of the matrix of factor weights showed that two components explained 100% of the variability and are therefore highly relevant in explaining the total variation between the morphological characteristics of the seedlings and the bioclimates. Plan 1-2 s characterized by eigenvalues of 95.40% for axis F1 and 4.60% for axis F2. The different descriptors contributing to the formation of the first

component (F1) and the second component (F2) revealed two groups. The first group consisted of the Montpellier (greenhouse) and the Daloa site characterized by higher heights, collar diameters, numbers of leaves and internode lengths of the seedlings than at the Korhogo site. The second group consisted of the Korhogo site, which was characterized by seedlings with longer and wider leaves than those at the Daloa site and the Montpellier greenhouse.



SH: seedling height; **Dcol:** Diameter at the collar of the seedlings; **N°L:** Number of leaves; **LL:** Leaf length; **LW:** Leaf Width; **LIN:** Length of internodes; **cm:** centimetres; **mm:** millimetres.

Fig 5. Projection of bioclimates and morphological parameters observed in PCA Plan 1-2 as a function of axis type

IV. DISCUSSION

4.1. Germination parameters

The germination of *Pterocarpus erinaceus* is epigeal generally. Our results confirm those of Adou et al., in 2013 and N'golo et al., in 2018, who all found the same type of germination. At germination, the leaves are simple with alternating spiral phyllotaxis and it is over time that compound leaves appear. This is due to the fact that in the very young stage, the seedling depends on the reserve (starch) contained in the embryo (seed) which only serves to emit simple pre-leaves with long petioles. These pre-leaves take over via photosynthetic activity following the disappearance of the embryo and the cotyledonary leaves. The seedling thus becomes independent and expresses its normal organogenesis by producing compound leaves (after 84 days and at 100 days on average). In fact, the cost of building its authentic development is high and therefore

requires progressive adaptation. The seeds were shelled in our study because of pericardial dormancy. Indeed, studies by Lauries in 1974, Rajendrudu and Naidu in 2001, Adou et al in 2013, Ameri et al in 2017 and N'golo et al in 2018 respectively on *Pterocarpus angolensis*, *Pterocarpus santalinus*, *Pterocarpus erinaceus*, *Faidherbia albida* and *Pterocarpus erinaceus* showed that the pericarp has a negative effect on germination rate and germination speed.

Our results showed overall that the seeds germination performances in Montpellier were poor; this is due to poor seed storage (long storage at an average temperature of 28 °C). In fact, the seeds were harvested in April, the peeled seeds were stored at room temperature (25 °C night and 32 °C day) for one and a half months until their shipment in Montpellier in mid-June. As the seeds were not stored at a low temperature, we think that the heat had a negative effect on the germination capacity of the seeds like in the study of

Pterocarpus erinaceus seeds by N'golo et al., in 2018 in the Haut Bandama reserve in Côte d'Ivoire and in the study of *Faidherbia albida* seeds by Ameri et al. (2017). However, good performances were recorded in Daloa probably due to the humid tropical climate that favoured the harmonious development of forest species and the relatively rich soil. Indeed, several studies have demonstrated the effect of climate and soil poverty on the germination of certain species (Giordano 1972; Soloviev et al. 2004; Dianda et al. 2009; Sambe et al. 2010). In addition, the seeds were sown immediately after harvesting and shelling at the Korhogo and Daloa sites, which explains the short germination latency times observed at these two sites; moreover, Daloa is a transition zone between forest and savannah, both savannah and forest species are found there, and all crops that depend on the savannah and forest zones develop there without exception. Korhogo follows just after Daloa in terms of recorded performances, indeed Korhogo is part of the distribution area of *Pterocarpus erinaceus* (Adjonou et al. 2010; Ouedraogo et al., 2006; Kossi et al., 2015; Anonymous 2016). In the same distribution area (in Niger), Amani et al. (2015) reported high germination rates ranging from 70 to 100% in four species of Combretaceae with germination duration of 9 to 18 days. In spite of the absence of pre-treatment of the seeds, the results were satisfactory, in contrast to those of Adou et al. (2013), who reported a germination rate of 29%, a latency time of four days and a germination duration of 11 days. In the study by N'golo et al. (2018), the seeds were pre-treated, and the maximum germination rate was 68.5% with a maximum delay of days and a maximum germination speed of 11.42 days. Ameri et al. (2017) obtained a low germination rate (27%) with non-pre-treated seeds of *Faidherbia albida*; whereas Ahoton et al., in 2009 and Amonum et al., in 2016 obtained a high germination rate with treated seeds of *Parkia biglobosa*.

Analysis of variance indicated that there was no significant difference between germination parameters according to the seed trees, however germination was expressed differently from one site to another except for the germination spread parameter which was statistically identical regardless of the study site. This is because although the composition and variability of seeds were practically the same (size and mass) from one seed tree to another, the environmental conditions (climate and soil type) were influenced germination. This is the case for many study (Assogbadjo et al., 2005, 2006; Dianda et al., 2009; Sambe et al., 2010). Indeed, the plant adapts to the conditions imposed by the microclimate (environment of location).

The correlation matrix showed that the germination rate is negatively correlated with all other germination parameters. This means that the higher the germination rate, the lower the germination latency time, the shorter the germination

delay, the faster the speed (fewer days) and the shorter the germination spread.

4.2. Development parameters

Generally high values were recorded at the Montpellier greenhouse because of the stable climate (no temperature fluctuations or insect attacks) in the greenhouse and a substrate rich in mineral elements that allowed the seedlings to develop well and flourish. Morphological parameters were moderately poor in Korhogo due to the unstable dry tropical climate and abundant attacks by larvae. Studies by Salazar and Quesada (1987), Dianda and Chalifour (2002), Maranz and Wiesman (2003), Soloviev et al. (2004) have already shown the effect of the original climate or climatic zone, soil, mother trees and soil poverty on the germination, growth and morphological development of several plant species. The results obtained by N'golo et al. (2018) contradict ours, as they indicate that at two weeks, the number of leaves was six, the average height of the seedlings was 7.5 cm and the diameter was 1 mm, and three months later the seedlings reached a diameter of 5 mm with an average height of 40 cm. In the first results of SODEFOR research on *Pterocarpus erinaceus*, Adou et al. (2013) reported average plantlet heights of 4.5 cm and 5.4 cm in, respectively, three weeks and one month. Using five growth accelerators on a legume (*Parkia biglobosa*) of the same family (Fabaceae) as *Pterocarpus erinaceus* in Benin at 140 days, Gnanglé et al. (2010) reported an average seedling height of 26.3 cm, an average diameter of 6.6 mm with an average of 8.5 leaves. On the other hand, in Niger, Amani et al. (2015), reported heights ranging from 7.71 cm to 25.8 cm with diameters ranging from 2.68 mm to 3.22 mm in four families of Combretaceae.

Analysis of variance showed that there was no significant difference from one seed tree to another for morphological parameters, and only the number of leaves and leaf length differed from one seed tree to another. However, the site only influenced the height of seedlings and the length of internodes. The climatic conditions of the site affected seedling length. The more favourable the conditions (rich soil and humid tropical climate), the vigor and larger the seedling (Montpellier and Daloa sites). This fact was confirmed by the principal component analysis, which indicated that in Montpellier and Daloa sites, seedling heights, collar diameters, leaf counts and internode lengths were higher than those observed in Korhogo.

V. CONCLUSION

This study found that a long shelf life of *Pterocarpus erinaceus* seed at room temperature had a negative effect on the performance and germination of dehulled seeds. The study also showed that the germinative expression was

basically the same from one seed tree to another and that only the site significantly influenced the germination expression through the climate and the type of soil. Correlations showed that the higher the germination rate, the shorter the waiting time, the shorter the germination delay, the slower the germination speed and the shorter the germination duration. The study also showed that a stable (greenhouse), healthy climate (with no larval attacks), rich soil and a humid tropical climate are essential for the harmonious development of *Pterocarpus erinaceus* seedlings, as the height, diameter, number of leaves and length of internodes are higher. The seedlings morphological parameters were almost identical from one seed tree to another ($p > 0.05$), while the site significantly influenced the height and length of the seedling internodes ($p < 0.05$). Principal component analysis showed that the Montpellier greenhouse and the Daloa site are favorable because they resulted in greater heights, collar diameters, leaf counts and internode lengths than the Korhogo site. these results can be a decision-making guide for the artificial regeneration of *Pterocarpus erinaceus* stands, for the establishment of permanent plots within the framework of reforestation or agroforestry programmes based on this species from a nursery. They are a useful source of information for nurserymen and for the sustainable management of *Pterocarpus erinaceus* forest populations in Côte d'Ivoire and the West African sub-region.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was financed by the Ministry of Higher Education and Scientific Research of Côte d'Ivoire, the French Development Agency and IRD (*Institut de Recherche pour le Développement*) within the framework of PRESeD-CI 2 (Renewed Partnership for Research for Development in Côte d'Ivoire) and C2D (Debt Reduction Contract) of the AMRUGE-CI project (Support for the Modernization and Reform of Universities and *Grandes Ecoles* of Côte d'Ivoire). The authors are grateful to the *Centre de Coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement* (CIRAD) for providing a greenhouse (controlled environment) and the technical equipment necessary to conduct the study.

VI. CREDIT AUTHORSHIP CONTRIBUTION STATEMENT

Beda I Adji: Conception, methodology, supervision, software, formal analysis, writing the paper, resources, data acquisition and analysis. **Sélastique D Akaffou:** Paper reading, Project administration, methodology, resources, data acquisition, supervision, writing the paper - original project, research and acquisition of funding. **Henri K**

Kouassi, Yao P Houphouet and Jérôme Duminil: writing the paper - original project, research and acquisition of funding. **Sylvie A Sabatier:** Paper reading, Project administration, methodology, resources, data acquisition, supervision, writing the paper - original project, research and acquisition of funding.

VII. CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that there is no conflict of interest either between the authors, or between the organisations which financed the work, or on the site used for the experiments. All the authors agree to the publication of the submitted version of the paper.

VIII. DATA AVAILABILITY

The datasets generated during and/or analysed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

REFERENCES

- [1] Adji, B.I., Akaffou, S.D., Kouassi, K.H., Houphouet, Y.P., Duminil, J. and Sabatier, S. (2020) Influence of Different Environments on Germination Parameters and Seedling Morphology in *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss (Meliaceae). *American Journal of Plant Sciences*, 11, 1579-1600. <https://doi.org/10.4236/ajps.2020.1110114>
- [2] Adjonou K, Ali N, Kokutse AD, Kokou K (2010) Étude de la dynamique des peuplements naturels de *Pterocarpus erinaceus* Poir. (Fabaceae) surexploités au Togo. *Bois et Forêts des Tropiques*, N°306 (1), pp 33-43.
- [3] Adou k, konan kJc, Diarra F (2013) Note sur le Vène. Premiers résultats de travaux de recherche sur le vène, a la sodefor. 2p. <http://ci.chm-cbd.net/biodiversity/fauneflore/flore/flore-terrestre/note-sur-le-vene>
- [4] Ahoton LE, Adjakpa JB, M'po IM, Akpo EL (2009) Effet des prétraitements des semences sur la germination de *Prosopis africana* (Guill., Perrot. et Rich.) Taub., (Césalpiniacées). *Tropicultura* 27 (4) : 233-238.
- [5] AISA (2019) Association Ivoirienne des Sciences Agronomiques. 10 p. <https://pratik.ci/annuaire>
- [6] Akaffou SD, Kouamé KA, Gore BBN, Abessika YG, Kouassi KH, Hamon P, Sabatier S, Duminil J (2019) Effect of the seeds provenance and treatment on the germination rate and plants growth of four forest trees species of Côte d'Ivoire. *J. For. Res.* 10 p. DOI : <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01064-y>
- [7] Anonymous (2019) *Pterocarpus erinaceus* Poir. First published in Lamarck's *JBAM, Encycl.* 5: 728 (1804). In the GBIF Secretariat (2019). Taxonomy of the GBIF Ridge. Checklist dataset <https://doi.org/10.15468/39omei> accessed via GBIF.org on 2021-03-05.

- [8] Anonymous (2019) [https:// www.fr-climatedata.org](https://www.fr-climatedata.org). Accessed in October 2019.
- [9] Anonymous (2016) [https://uses.plantnet-project.org/en/Pterocarpus_erinaceus_\(PROTA\)](https://uses.plantnet-project.org/en/Pterocarpus_erinaceus_(PROTA)). <https://www.prota4u.org/database/protav8.asp?fr=1&h=M4&t=Pterocarpus,erinaceus&p=Pterocarpus+erinaceus#Synonyms>
- [10] Amani MM, Inoussa I, Dan Guimbo A, Mahamane M, Saadou AM, Lykke (2015) Germination et croissance de quatre espèces de Combretaceae en pépinière. *Tropicultura* 33 (2) : 123-145
- [11] Ameri AH, Daldoum AMD (2017) Effect of different pretreatment methods and materials on germination potential of *Faidherbia albida* seeds, *Scholars Journal of Agriculture and Veterinary Sciences* 4 (3) : 86-90.
- [12] Amonum JI, Nyam RT, Gbande S (2016) Effect of pre-treatments on seed germination of *Parkia biglobosa* (Benth). *Journal of Research in Forestry, Wildlife and Environment* 8 (4) : 364-369.
- [13] Assogbadjo AE, Kyndt T, Sinsin B, Gheysen G, Van Damme P (2006) Patterns of genetic and morphometric diversity in baobab (*Adansonia digitata* L.) populations across different climatic zones of Benin (West Africa). *Annals of Botany*, 97 : 819-830.
- [14] Assogbadjo AE, Sinsin B, Codjia JTC, Van Damme P (2005) Ecological diversity and pulp, seed and kernel production of the baobab (*Adansonia digitata*) in Benin. *Belgian Journal of Botany*. 138(1) : 47-56.
- [15] Bakayoko A, Khatelain C, Kone MW, Kone I, Ouattara D, Yao K, Gautier L (2020) Occurrences des échantillons de plantes de l'Herbier du Centre Suisse de Recherches Scientifiques (CSRS) en Côte d'Ivoire. Version 1.2. Centre Suisse de Recherches Scientifiques en Côte d'Ivoire. Occurrence dataset <https://doi.org/10.15468/gdbrsj> Ajouter au projet Citavi par DOI accessed via GBIF.org on 2021-03-05.
- [16] Barry AA, Caesar J, Tank AMGK, Aguilar E, McSweeney C, Cyrille AM, Nikiema MP, Narcisse KB, Sima F, Stafford G, Touray LM, Ayilari-Naa JA, Mendes CL, Tounkara M, Gar-Glahn EVS, Coulibaly MS, Dieh MF, Mouhaimouni M, Oyegade JA, Sambou E, Laogbessi ET (2018). West Africa climate extremes and climate change indices. *Int. J. Climatol.* 38, e921–e938. <https://doi.org/10.1002/joc.5420>.
- [17] Berka S, Abdelkader H (2001) Effets de quelques traitements physico-chimiques et de la température sur la faculté germinative de la graine d'Arganier. *Revue Forestière Française* 53 (2) :125-130.
- [18] Bornand M, Barthès JP, Bonfils P (1999) Carte des pédopaysage de la région languédoc-Roussillon-Département de l'Hérault. INRA Montpellier 2010. 2p
- [19] Choat B, Jansen S, Brodribb TJ, Cochard H, Delzon S, Bhaskar R, Bucci SJ, Feild TS, Gleason SM, Hacke UG, Jacobsen AL, Lens F, Maherali H, Martinez-Vilalta J, Mayr S, Mencuccini M, Mitchell PJ, Nardini A, Pittermann J, Pratt RB, Sperry JS, Westoby M, Wright IJ, Zanne AE (2012) Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature* (491) : 752-755. doi:10.1038/nature11688
- [20] CITES Secrétariat (2016) Notification of the Parties No. 2016/008. https://cites.org/sites/default/files/notif/E_Notif_2016_008.pdf
- [21] CoP17 Prop. 57 (2016) Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction. « dix-septième session de la conférence des parties Johannesburg (Afrique du sud) ; 24 septembre 5 octobre 2016 : examen des propositions d'amendement des annexes I et II ». 17 p.
- [22] Dianda M, Bayala J, Diop T, Ouédraogo SJ (2009) Improving growth of shea butter tree (*Vitellaria paradoxa* C.F.Gaertn.) seedlings using mineral N, P and arbuscular mycorrhizal (AM) fungi. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 13(1) : 93-102.
- [23] Dianda M, Chalifour FP (2002) Effets du N minéral et du génotype de la plante sur la croissance et la nodulation de *Faidherbia albida*. *Can. J. Bot.*, 80(3) : 241-254.
- [24] Diatta S, Salifou I, Sy Mo, Kabore-Zoungrana CY, Banoin M, Akpo LE (2009) Évaluation des potentialités germinatives d'un ligneux fourrager sahélien : *Maerua crassifolia* Forssk., Capparaceae. 1-11p <http://www.irrd.org>
- [25] Dipelet UGB, Doumenge C, Loumeto JL, Jacques F, Gonmadje C, Doyle M (2019) Des confusions entre espèces préjudiciables à la gestion durable des essences forestières : l'exemple des acajous d'Afrique (Khaya, Meliaceae). *Bois et forêts des tropiques* 339 (1) : p 17-32.
- [26] Djaha JA, N'da AAA, Koffi EK, Ballo CK, Coulibaly M (2012) Croissance et aptitude au greffage de deux génotypes d'anacardier (*Anacardium occidentale* L.) élites utilisées comme porte-greffe en Côte d'Ivoire. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 6(4) : 1453-1466, August 2012 14p. <http://ajol.info/index.php/ijbcs>. DOI : <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v6i4.5>
- [27] Douma S, Adamou MM, Aboubacar K, Alleidi I, Boubacar AN (2019) Effet du régime d'irrigation sur la germination et la croissance en pépinière de *Parkia biglobosa* (Jacq.) G. Don. *J. Anim. Plant Sci.* 40 (1) : 6573-6583. <http://www.m.elewa.org/JAPS> ; ISSN 2071-7024
- [28] Dumenu WK (2019) Assessing the impact of felling/export ban and CITES designation on exploitation of African rosewood (*Pterocarpus erinaceus*). *Biological Conservation* 236 (2019) 124–133. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.05.044>
- [29] FAO (2005) State of the World's Forests disponible sur <http://www.fao.org/3/a-y5574e.pdf>.
- [30] Giordano E (1972) Interaction de la sélection et de la culture intensive. *Unasylva*, 97- 98 : 82-88.
- [31] Gnanlè PCR, Glele K, Oumorou M, N'djolosse K, Bonou W, Sokpon N (2010) Tests de croissance de jeunes plants de néré (*Parkia biglobosa*, Jack, R. Br.) en pépinière. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 4(6) : 1939-1952
- [32] Goba AE, Koffi G, Raoul SS, Leonie C K, Yeboa AK (2019) Structure démographique et régénération naturelle des peuplements naturelle de *Pterocarpus erinaceus* Poir. (Fabaceae) des savanes de Côte d'Ivoire. *Bois et forêt des Tropiques*, 341 (3) : 5-14
- [33] Gorgon IT, Olga DY, Komla EA, Francois W, Kouami K (2015) Essai de germination et de croissance au stade

- juvénile des souches locales de *Jatropha curcas* en république centre africaine. *European Scientific Journal* ; vol.11, No.15. 260-276.
- [34] Goula BT, Brou K, Brou T, Savane I, Vamoryba F, Bernard S (2007) Estimation des pluies exceptionnelles journalières en zone tropicale : cas de la Côte d'Ivoire par comparaison des lois Log normale et de Gumbel. *Journal des Sciences Hydrologiques*. 52 (1) : 49–67.
- [35] Guillaumet JL, Adjanohoun E, Avenard J M, Eldin M, Girard G, Circoulin J, Toucheboeuf P, Perraud A (1971) Le milieu naturel de Côte d'Ivoire. Mém. ORSTOM no50. ORSTOM, Paris. Pp156-264.
- [36] Hérault B, N'guessan AK, Ouatarra N, Ahoba A, Bénédet F, Coulibaly B, Doua-bi Y, Koffi T, Koffi-Konon JC, Konaté I, Tieoulé F, Wourro F, Zo-Bi IC, Louppe D (2020) The long-term performance of 35 tree species of sudanian West Africa in pure and mixed plantings. *Forest Ecology and Management* 468 (2020) 118171. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118171>
- [37] Houndonougbo JSH, Kassa B, Mensah S, Salako VK, Glèlè Kakaï R, Assogbadjo AE (2020) A global systematic review on conservation and domestication of *Parkia biglobosa* (Jacq.) R. Br. ex G. Don, an indigenous fruit tree species in Sub-Saharan Africa traditional parklands: current knowledge and future directions. *Genet Resour Crop Evol* (2020) 67:1051–1066. <https://doi.org/10.1007/s10722-020-00892-w>
- [38] Koffi KJ, Kouassi AF, Ake-assi AE, Yao K, N'goran KSB, N'Goran B (2018) Liste de quelques espèces à statuts particuliers de l'herbier du Centre National de Floristique (CNF) en Côte d'Ivoire. Version 1.2. Centre National de Floristique. Occurrence dataset <https://doi.org/10.15468/ckbuue> Ajouter au projet Citavi par DOI accessed via GBIF.org on 2021-03-05.
- [39] Kossi NS, Kossi A, Abdou RR, Adzo DK, Kouami K, Rabiou H, Pouwisawe K, Babou AB, Ali M (2015) Importance socio-economique de *pterocarpus erinaceus* Poir. au Togo. *European Scientific Journal*, N° 23 (11) : p 135-145
- [40] Laurie, M. V., 1974. Tree planting practices in African savannas. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. pp. 42-43.
- [41] Leroy M, Derroire G, Vendé J, Leménager T (2015) La gestion durable des forêts tropicales. De l'analyse critique du concept à l'évaluation environnementale des dispositifs de gestion. *Bois et forêts des tropiques*, N° 325 (3) : p 86-87.
- [42] Louppe D, Ouattara N (1996) Les arboretums d'espèces locales en Nord Côte d'Ivoire. IDEFOR.
- [43] Mabetty T (2018) Le néré, un arbre du patrimoine de la Haute Guinée. *Belgeo*, 2. 24p, consulté le 3 avril 2020. URL : <http://journals.openedition.org/belgeo/21569>
- [44] Maranz S, Wiesman Z (2003) Evidence for indigenous selection and distribution of the shea tree, *Vitellaria paradoxa*, and its potential significance to prevailing parkland savanna tree patterns in sub-Saharan Africa north of the equator. *J. Biogeogr.*, 30: 1505-1516.
- [45] Mbowa C, Chhinh S, Samboua B, Skolec D (2013) Potential of dendrochronology to assess annual rates of biomass productivity in savanna trees of West Africa. *Dendrochronologia* 31 : 41– 51. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dendro.2012.06.001>
- [46] Millan M (2016). Analyse de la variabilité des traits architecturaux des formes de croissance dans les communautés végétales. Thèse de Botanique. Université de Montpellier. Français. 178 p. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02489116>
- [47] MINEF (2013) Décret n° 2013-508 du 25 juillet 2013 portant interdiction de l'exploitation, de la coupe, du transport, de la commercialisation et de l'exportation de *Pterocarpus* spp appelé communément « bois de vène ». *Journal Officiel de la République de Côte d'Ivoire*, 22 août 2013. pp 532-533.
- [48] Nations Unies (2002) Rapport du Sommet mondial pour le développement durable. Johannesburg (Afrique du Sud) 26 août-4 septembre 2002. 191p.
- [49] N'golo B, Noufou DO, Djézou K, Adama B, Fezan H T (2018) Effets de cinq prétraitements sur la germination du vène (*Pterocarpus erinaceus* Poir., Fabaceae) dans la Réserve du Haut Bandama (Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal*, 30 (14) : p 438-453
- [50] Ouedraogo A, Adjima T, Hahn-Hadjali K, Guinko S (2006) Diagnostic de l'état de dégradation des peuplements de quatre espèces ligneuses en zone soudanienne du Burkina Faso. *Sécheresse*, 17 (4) : p 485-491
- [51] Perraud A (1971) Les sols. In : Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoires ORSTOM 50 : 69-390.
- [52] Rabiou H, Adjonou K, Issaharou-matchi I, Segla KN, Bationo BA, Kohutse AD, Mahamane A, Kokou K (2019) Influence of anthropogenic and ecological factors on stand structure of *Pterocarpus erinaceus* Poir. in Sudanian and Sahelian zones of Burkina Faso and Niger. *J. Ecol. Nat. Environ.* Vol. 11(7), pp. 98-107. DOI: 10.5897/JENE2019.0776
- [53] Rabiou H, Segla KN, Adjonou K, Radji AR, Moussa MB, Saley K, Kokutse AD, Bationo BA, Mahamane A, Kokou K (2015) Estimate trees potential and wood cubage in natural stands of *Pterocarpus erinaceus* Poir. based on ecological gradient in West Africa. *Int.J.Curr.Microbiol.App.Sci* (2015) 4(5): 1103-1117
- [54] Rabiou H, Diouf A, Bationo AB, Segla NK, Adjonou K, Kokutse DA, Radji R, Kokou K, Mahamane A, Saadou M (2015) Structure des peuplements naturels de *Pterocarpus erinaceus* Poir. dans le domaine soudanien, au Niger et au Burkina Faso. *Bois et forêts des tropiques* 325 (3) : p 71-125.
- [55] Rajendrudu G, Naidu CV (2001) Influence of kinetin and nitrogenous salts on seed germination of red sanders (*Pterocarpus santalinus* Linn. f.). *Seed Science and Technology* 29 (3) : 669-672.
- [56] REDD+ (2017) « Stratégie nationale Redd+, Côte d'Ivoire » 15p. <https://chm.cbd.int/api/v2017/documents/>
- [57] Salazar R, Quesada M (1987) Provenance variation in *Guazuma ulmifolia* L. in Costa Rica. *Commonwealth Forestry Review*, 66: 317-324.
- [58] Sambe M, Sagna M, Sy MO (2010) Seed germination and in vitro plant regeneration of *Parkia biglobosa* (Jacq.) Benth. *African Journal of Biotechnology*, 9(21): 3099-3108.
- [59] Segla KN, Adjonou K, Rabiou H, Bationo BA, Mahamane A, Guibal D, Kokou K, Chaix G, Kokutse AD, Langbour P

- (2020) Relations between the ecological conditions and the properties of *Pterocarpus erinaceus* Poir. wood from the Guinean-Sudanian and Sahelian zones of West Africa. *Holzforschung* aop. 11 p. <https://doi.org/10.1515/hf-2019-0250>
- [60] Segla NK, Rabiou H, Adjonou K, Moussa BM, Saley K, Radji RA, Kokutse AD, Bationo AB, Mahamane A, Kokou K (2016) Population structure and minimum felling diameter of *Pterocarpus erinaceus* Poir in arid and semi-arid climate zones of West Africa. *South African Journal of Botany* 103 (2016) 17–24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sajb.2015.09.005>
- [61] Soloviev P, Niang TD, Gaye A, Totte A (2004) Variabilité des caractères physicochimiques des fruits de trois espèces ligneuses de cueillette, récoltés au Sénégal : *Adansonia digitata*, *Balanites aegyptiaca* et *Tamarindus indica*. *Fruits*, 59 : 109-119.
- [62] Soro GE (2011) Modélisation statistique des pluies extrêmes en Côte d'Ivoire. Thèse unique. Abidjan (Côte d'Ivoire) : Université Nangui Abrogoua. 173 p
- [63] Zerbo P, Belem B, Mllogo-Rasolodimby J, Van Damme P (2010) Germination sexuée et croissance précoce d'*Ozoroainsignis* Del., une espèce médicinale du Burkina Faso. *Cameroon Journal of Experimental Biology* 2010 Vol. 06 N°02, 74-80.

PUBLICATION 4

Beda Innocent Adji, Dofou Sélastique Akaffou, Kouadio Henri Kouassi,
Yao Patrice Houphouet, Philippe De Reffye, Jérôme Duminil, Marc Jaeger and Sylvie
Sabatier. **2021**.

ALLOMETRIC MODELS FOR NON-DESTRUCTIVE ESTIMATION OF DRY BIOMASS
AND LEAF AREA IN *KHAYA SENEGALENSIS* (DESR.) A. JUSS., 1830 (MELIACEAE),
PTEROCARPUS ERINACEUS POIR., 1804 (FABACEAE) AND *PARKIA BIGLOBOSA*,
JACK, R. BR., 1830 (FABACEAE). *Trees* 35, 1905-1920. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02159-y>



Allometric models for non-destructive estimation of dry biomass and leaf area in *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss., 1830 (Meliaceae), *Pterocarpus erinaceus* Poir., 1804 (Fabaceae) and *Parkia biglobosa*, Jack, R. Br., 1830 (Fabaceae)

Beda Innocent Adji^{1,2} · Doffou Sélastique Akaffou¹ · Kouadio Henri Kouassi¹ · Yao Patrice Houphouet¹ · Philippe De Reffye² · Jérôme Duminil³ · Marc Jaeger² · Sylvie Sabatier²

Received: 21 December 2020 / Accepted: 4 June 2021
© The Author(s), under exclusive licence to Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2021

Abstract

Key messages Measuring biomass and leaf area using non-destructive methods is of great interest to avoid plant degradation. These data are necessary for biomass allocation and estimation of carbon distribution in trees using functional and structural growth models such as GREENLAB.

Abstract Organ biomass and leaf area are important parameters in plant physiology and production. They are used in structural and functional plant models to simulate tree architecture but are difficult to determine rapidly. Using stem length and internode diameter and leaf length and width to estimate them is a rapid, non-destructive field approach. We used the method on *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* and *Parkia biglobosa* in Côte d'Ivoire. Internodes and leaves of the three species were sampled in 2019 and 2020 on three categories of axis in the architecture of individuals of different ages to maximize size variability. All statistical relationships found in the linear, logarithmic, polynomial and power models used to estimate the dry biomass of organs and leaf area were significant in all three species ($P=0.0001$). The best models were obtained with the logarithmic transformation of the data. Three equation (linear, power and polynomial) were sufficient to estimate internode dry biomass (IDM), leaf dry biomass (LDM) and leaf area (LA) from the dimensions of the internodes (Volume: VL) and leaves (rachis length: RCL, number of primary leaflets: NLt, length: LLtL and width: LLtW of the largest primary leaflet in *Khaya senegalensis* and *Pterocarpus erinaceus*, then number of secondary leaflets: NSeLt, length: LSeLtL and width: LSeLtW of the largest secondary leaflet in *Parkia biglobosa*). In the field, the scientist will therefore make a choice according to his convenience among these proposed models. The best relationships between the measured organ dimensions and estimated parameters were defined by the following equations: $IDM = 0.45 * VL + 0.02$, $LDM = 1.07 * NLt * LLtL * LLtW - 2.74$ and $LA = 0.83 * NLt * LLtL * LLtW$ or $LA = 0.08 * [NLt * LLtL * LLtW]^2 + 1.13 * [NLt * LLtL * LLtW] - 0.27$ for *Khaya senegalensis*; $IDM = 1.15 * VL^{0.26}$, $LDM = 0.71 * RCL * LLtL * LLtW - 1.64$ and $LA = 0.74 * NLt * LtL * LtW + 0.15$ or $LA = 0.03 * [NLt * LLtL * LLtW]^2 + 0.65 * [NLt * LLtL * LLtW] + 0.23$ for *Pterocarpus erinaceus* then $IDM = 1.45 * VL^{0.39}$, $LDM = 0.23 * [NSeLt * LSeLtL * LSeLtW * NLt]^2 - 0.4 * [NSeLt * LSeLtL * LSeLtW * NLt] - 0.11$ and $LA = 1.81 * [NSeLt * LSeLtL * LSeLtW * NLt]^{0.65}$ for *Parkia biglobosa*. This method can be applied to estimate the organ biomass and leaf area of species of the same family as the target species in an agroforestry system.

Keywords *Khaya senegalensis* · *Pterocarpus erinaceus* · *Parkia biglobosa* · Allometric models · Non-destructive · Dry biomass and leaf area

Communicated by R. Guy.

✉ Beda Innocent Adji
adjibedainnocent@gmail.com; beda-innocent.adji@cirad.fr

Extended author information available on the last page of the article

Introduction

Easily measurable dimensions would be particularly useful, as they could provide a pathway through the thousands of field experiments and ecophysiological studies that each use only a few species (Westoby et al. 2002; Antunes et al.

2008; Tondjo et al. 2015; He et al. 2020; Huang et al. 2021). The ratio of leaf area to dry biomass is a good indicator of plant productivity (Marron et al. 2005; Lin et al. 2020). Biomass and light distribution within a tree and between the tree and the intercrop can be estimated using radiation balance models based on a description of the trees (Leroy et al. 2007). Understanding the functional links between stem and leaf characteristics, yield and carbon distribution can be facilitated by functional and structural plant models (Fourcaud et al. 2008; Tondjo et al. 2015; 2018). These models help understand the plasticity of plants and their ability to adapt to their physical environment. Due to its close relationship with photosynthetic assimilation, specific leaf area is used in structure–function models to understand the variability of plant production (De Reffye and Hu 2003) or one of the parameters used to compare environments in ecology (Westoby et al. 2002). Both types of studies require rapid and non-destructive methods to determine leaf area and organ biomass.

Khaya senegalensis, *Pterocarpus erinceus* and *Parkia biglobosa* are native savannah agroforestry species that are highly prized and hence overexploited for their multiple uses, leading a loss of diversity that could eventually lead to their extinction (Gaoué and Ticktin 2008; Dumenu 2019; Goba et al. 2019; Houndonougbo et al. 2020; Adji et al. 2020). Modeling their growth using the GREENLAB functional model (Diao et al. 2011; Tondjo et al. 2018; Letord et al. 2020; Reffye et al. 2021) that accounts for the dynamics of tree development will make it possible to optimize their cultivation and incorporate them in agroforestry systems, thereby enabling their preservation and sustainable exploitation. However, the key parameters of this model are organ biomass and leaf area, which are sometimes difficult to measure rapidly and non-destructively. A simple predictive and non-destructive approach is thus required to collect the data required for the model quickly and easily, especially in the case of compound leafy plants like these three species studied here. To this end, the Montgomery equation (ME) which generally describes a proportional relationship between leaf area (LA) and the product of leaf length (LL) and width (LW) ($LA = a * LL * LW$, where “a” is called the Montgomery coefficient), applied mostly on single leaves, could it work on our species with complex leaves?

Models for the non-destructive prediction of organ biomass and leaf area are useful tools for research in agronomic experiments. For example, such models allow researchers to measure stem, leaf area and leaf biomass of the same plants during the plant growth period, thereby reducing experimental variability (Demirsoy et al. 2004; Tondjo et al. 2015). Leaf area can be determined using models instruments. New point instruments have been developed for this purpose, but they are very expensive

and unnecessarily complex for elementary studies. Non-destructive prediction of biomass and leaf area saves time compared to geometric measurements, and no expensive instruments are required (Demirsoy et al. 2004; Leroy et al. 2007). Allometries of organ biomass and leaf size are generally predictive models based on measurements of stem height, diameter, and volume, then leaf length and width (Seleznyova and Greer 2001; Pinto et al. 2004; Serdar and Demirsoy 2006). Most are based on the establishment of a linear regression formula (Westoby and Wright 2003). In the majority of species, the product of leaf length and width is correlated with leaf area and leaf biomass, while the volume of stem phytomers considered as cylinders is correlated with stem biomass (Leroy et al. 2007; Tondjo et al. 2015; Okoma et al. 2016).

Although many studies have focused on indirect measurements of leaf area, only a few have estimated dry leaf mass from leaf size and dry or fresh stem mass from stem volume. The allometric prediction models were developed in previous studies for coffee, teak, peach, chestnut, grape, avocado, and kiwi (Bianco et al. 2003; Demirsoy et al. 2004; Serdar and Demirsoy 2006; Demirsoy 2009; Tondjo et al. 2015; Okoma et al. 2016). However, no predictive models of biomass and leaf area in savannah forest species are available to date. We, therefore, sought to produce simple and reliable linear equations for *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinceus* and *Parkia biglobosa* that predict stem and leaf biomass and then leaf area with linear measurements linking the product of stem (height and diameter) and leaf, primary and secondary leaflet (length and width) dimensions to organ biomass and leaf area in these three species. These relationships will help define indirect non-destructive methods for measuring parameters in the field.

Materials and methods

Plant material

The plant material consisted of two types of individuals belonging to three tree species with different dendrometric characteristics and leaf shapes (Table 1). On the one hand, seedlings raised in nurseries in three different locations sampled at 6 months, 12 months, and 24 months of age; and on the other hand, spontaneous individuals (wildings) randomly sampled in the forest. The leaves and internodes (Fig. 1) of each individual were collected from the base to the top of the tree on three categories of axes resulting from the functioning of the meristems in each species: the main stem (A1), the branches (A2) and the ramifications (A3) so as to include all internode shapes and leaf sizes

Table 1 Dendrometric and morphological characteristics and number of plant materials used in each of the three species studied

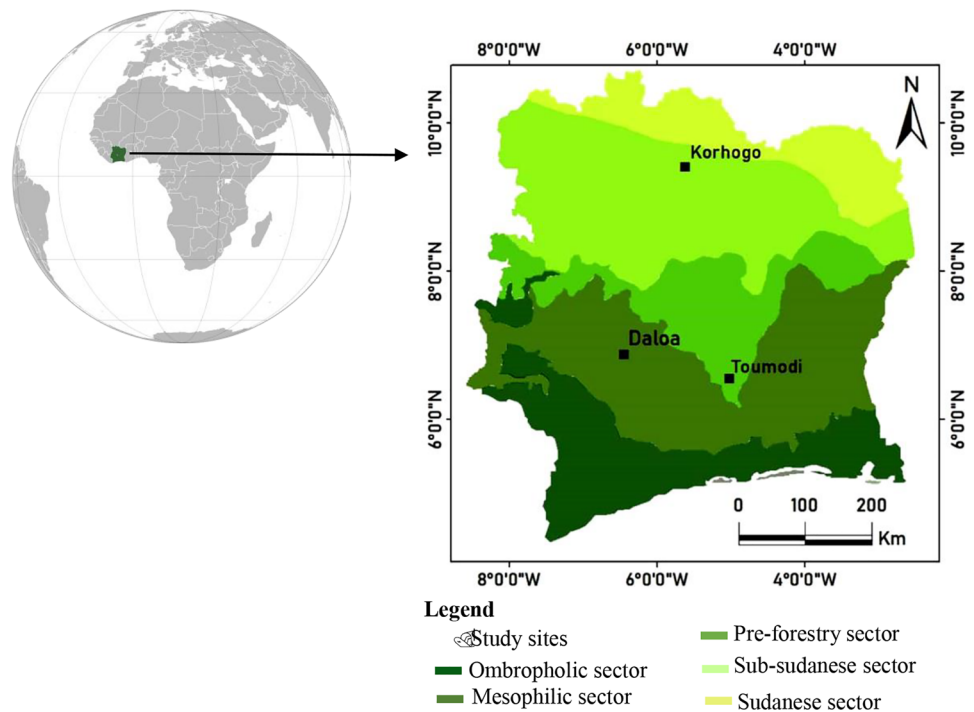
Species	Age type	Number of trees	Total height (m)	Basal diameter (cm)	Leaf shape	Axis category and number of organs								
						Number of internodes			Number of leaves					
						A1	A2	A3	A1	A2	A3			
<i>Khaya senegalensis</i> (Meliaceae)	6 months	60	0.8 ± 0.02 ^c	4.1 ± 0.07 ^b	Simple and imperipennate compounds (1 to 7 leaflets)	307	0	0	421	0	0			
	12 months	60	1.77 ± 0.05 ^b	7.4 ± 0.01 ^{ab}	Paripennate compounds (6 to 18 leaflets)	1024	117	0	1309	207	0			
	24 months	36	3.51 ± 0.12 ^a	11.02 ± 0.12 ^a	Paripennate compounds (8 to 24 leaflets)	871	150	0	910	204	0			
	Wild plant	20	2.1 ± 0.68 ^{ab}	6.5 ± 0.14 ^{ab}	Paripennate compounds (6 to 26 leaflets)	302	104	70	353	124	93			
<i>Pterocarpus erinaceus</i> (Fabaceae)	6 months	60	0.53 ± 0.07 ^c	2.4 ± 0.01 ^c	Simple and imperipennate compounds (1 to 11 leaflets)	312	103	0	328	151	0			
	12 months	60	0.95 ± 0.04 ^b	5.7 ± 0.03 ^b	Paripennate compounds (6 to 12 leaflets)	672	261	0	700	300	0			
	24 months	36	2.63 ± 0.1 ^a	7.33 ± 0.13 ^a	Paripennate compounds (10 to 18 leaflets)	474	127	68	493	209	114			
<i>Parkia biglobosa</i> (Fabaceae)	Wild plant	20	1.69 ± 0.23 ^{ab}	5.2 ± 0.21 ^b	Paripennate compounds (10 to 22 leaflets)	313	200	48	500	301	53			
	6 months	60	0.67 ± 0.03 ^b	3.38 ± 0.04 ^b	Bipinnate compounds (3 to 6 leaflets and 18 to 26 secondary leaflets)	441	0	0	463	0	0			
	12 months	60	1.12 ± 0.11 ^a	6.1 ± 0.02 ^{ab}	Bipinnate compounds (6 to 20 leaflets and 18 to 30 secondary leaflets)	541	97	0	503	114	0			
	24 months	36	1.57 ± 0.09 ^a	8.71 ± 0.11 ^a	Bipinnate compounds (6 to 24 leaflets and 18 to 30 secondary leaflets)	390	108	0	421	207	0			
	Wild plant	20	1.25 ± 0.11 ^a	5.4 ± 0.41 ^{ab}	Bipinnate compounds (6 to 36 leaflets and 18 to 38 secondary leaflets)	384	161	43	361	120	67			

a, b and c: comparison using the Student–Newman–Keuls tests; different letters in two lines imply a significant difference at the 95% threshold. Bipinnate compound leaves; decomposed leaf; Leaflets: secondary leaf or primary leaflet; Leaflet of the decomposed leaf; tertiary leaf or secondary leaflet



Fig. 1 Images relative to axis categories considered (a), to the sampling of leaves (b) and internodes (c)

Fig. 2 Geographical location of the study area



from the smallest to the largest (Fig. 1). A total of 2,945 internodes and 3,621 leaves were sampled on *Khaya senegalensis*, 2,578 internodes and 3,149 leaves were sampled on *Pterocarpus erinaceus*, and 2,165 internodes and 2,256 leaves were sampled on *Parkia biglobosa*. The number of internodes and leaves evaluated for each axis category per species is presented in Table 1.

Methods

Study sites

The organs were collected in three locations in Côte d'Ivoire (Fig. 2). The characteristics of the study sites are listed in Table 2.

Table 2 Characteristics of the locations prospected (Louppe and Ouattara 1996; Hérault et al. 2020; Djaha et al. 2012; Séka et al. 2009; N'cho 1991; Ettien 2004; Akassimadou and Yao-Kouamé 2014; Adjanooun 1964)

Site/location	GPS coordinates	Vegetation	Climate	Temperature (°C)	Rainfall (mm/year)	Type of soil
Korhogo	5°36'12,39,612"W;9°33'24,68,988" N	Clear forest (savannah with trees and grass)	Dry tropical	26.6–35.7	817–1216	Ferruginous (90%) and Ferralitic (10%): superficial gravelly soil, deep gravel with a heavy texture, low in organic matter, highly desaturated
Toumodi	5°1'34,95,576"W;6°22'42,67,848" N	Semi-clear forest (wooded savannah)	Wet tropical	26.6–30	1092–1200	Ferralitic soil on granitic bedrock (sandy-clayey soil), characterized by the weak differentiation and friable consistency of their horizons
Daloa	6°26'9,19,788"W;6°54'32,058" N	Tropical rainforest	Wet tropical	21–34	1000–1900	Ferralitic, deep, acidic and desaturated in exchangeable bases, rich in organic matter

°C degree Celsius, *mm* millimeter, *W* west, *N* north

Data collection

Individual trees of each species were described phytomere by phytomere and the topology was recorded using MTG formalism (Godin and Caraglio 1998). The internodes and leaves were sampled in different climatic conditions in 2019 and 2020 along with three categories of axis in the architecture of 6-, 12- and 24-month-old planted individuals and wildlings to maximize size variability and validate the model.

The following information was recorded for each phytomere: internode length (IL), internode diameter (ID), length of single leaves (LL), width of single leaves (LW), rachis length of compound leaves (RCL), length of the longest primary leaflet of the compound leaf (LLtL), width of the largest primary leaflet of the compound leaf (LLtW), number of primary leaflets (NLt), length of the largest secondary leaflet of the bipinnate leaf (LSeLtL), width of the largest secondary leaflet of the bipinnate leaf (LSeLtW) and the number of secondary leaflets (NSeLt). The diameter of the internode was the average of two perpendicular diameters. The lengths of the simple leaves, the largest leaflets of the compound leaves, and the largest secondary leaflets of the bipinnate leaves were measured from the tip of the leaf blade to the base of the corresponding leaf blade; the widths of the simple leaves, the largest leaflets of the compound leaves and the largest secondary leaflets of the bipinnate leaves corresponded to the maximum width of the leaf blade perpendicular to the main vein of the corresponding leaf blade; the lengths of the rachis were measured from the base of the petiole to the end of the primary rachis. The internodes fresh mass

(IFM) and leaves fresh mass (LFM) were weighed on a 0.001 g precision balance before being dried in an oven at 70 °C for 72 h. After oven drying, the internodes dry mass (IDM) and leaves dry mass (LDM) were again weighed in an anhydrous state on a 0.001 g precision balance.

Using a 45 megapixel Nikon Coolpix 4500 digital camera, digital photographs were taken of all the selected sheets. The surface area (cm²) of the sheet (leaf area, LA) was determined using Image J software (Rasband 2014). The volumes (cm³) of the internodes (VL) were calculated as cylinders: $VL = \pi * IL * \left(\frac{ID}{2}\right)^2$.

In the majority of studies, the main parameters used to estimate biomass and leaf area are leaf length and leaf width. In our study, we accounted for additional parameters (the number of primary (NLt) and secondary (NSeLt) leaflets, the length and width of the largest primary (LLtL and LLtW) and secondary (LseLtL and LseLtW) leaflets and the rachis length of compound leaves (RCL)) to improve the models in different ways and to refine the estimation of biomass and leaf area. In some cases, logarithmic transformation of the data was necessary to stabilize the variance of organs measures and normalize the data.

Models that estimate and predict dry organ biomass and leaf area were evaluated using linear ($Y = a * X + b$), logarithmic ($Y = a * \ln(X) + b$), power ($Y = a * X^b$) and polynomial ($Y = a * X^2 + b * X + c$) models. *Y* (dry organ biomass and leaf area) is the dependent response variable and *X* (internode volume or organ dimensions measured in the field) is one of the vectors of independent explanatory variables (predictor). Multiple regression analysis of the data was performed for each species separately until the sum of the square deviations was minimized. Regressions with widely scattered

point clouds of the confidence interval underwent logarithmic transformations of the data. The best models were determined based on the root-mean-square error of estimation and model fit. The models chosen and described in this paper were the most accurate, i.e., those with the smallest standard errors.

Data analysis

The analyses were descriptive statistics (mean and standard deviation), analysis of variance (two-way ANOVA) and allometric equations generated by regression analysis. The different parameters were evaluated using the Student–Newman–Keuls (SNK) test at the 5% threshold with SAS version 9.4 software. Multiple regressions were performed with XLSTAT 2014 version 7.5.

Results

Characteristics and interspecific variation of assessed parameters

Table 3 lists the characteristics and the descriptive statistics of all parameters assessed in each of the three species. Comparison of all parameters as a function of the three target species showed that all parameters differed statistically from one species to another ($P < 0.05$), except for the number of leaflets (NLt) which was statistically identical in the three species studied here ($P > 0.05$).

Estimating internode dry biomass from internode volume

The correlations, linear regressions, logarithmic and power models between dry biomass and internode volumes for the three species are presented in Fig. 3. These figures show a high correlation ($r = 0.83–0.99$) of internode dry biomass (IDM) with internode volume (VL) in *Khaya senegalensis* (Fig. 3a, a1), a high correlation ($r = 0.91–0.98$) between dry biomass (IDM) and internode volume (VL) in *Pterocarpus erinaceus* (Fig. 3b, 3b1) and a strong correlation ($r = 0.85–0.99$) between biomass (IDM) and internode volume (VL) in *Parkia biglobosa* (Fig. 3c, c1). In the estimation of dry biomass (IDM), the regressions were significant ($P = 0.0001$, $R^2 = 0.81–0.98$, $IDM = 0.45*VL + 0.02$ and $IDM = 0.4*\ln[VL] + 0.83$) in *Khaya senegalensis* (Fig. 3a, a1); and significant ($P = 0.0001$, $R^2 = 0.78–0.94$, $IDM = 0.33*VL + 0.38$ and $IDM = 1.15*[VL]^{0.26}$) in *Pterocarpus erinaceus* (Fig. 3b and 3b1) and significant

($P = 0.0001$, $R^2 = 0.73–0.96$, $IDM = 0.47*VL + 0.44$ and $IDM = 1.45*[VL]^{0.39}$) in *Parkia biglobosa* (Fig. 3c, c1).

Estimation of leaf dry biomass from the product of leaf dimensions

The correlations, linear regression and polynomial models between leaf dry biomass and the product of leaf dimensions are presented in Fig. 4. Most of the best models obtained were polynomial models with a logarithmic transformation of the data. But in the field, the collector will be able to make these own choices. We found a strong correlation between leaf dry biomass (LDM) and the product of primary leaflet number (NLt) by the length of the primary largest leaflet (LLtL) by the width of the primary largest leaflet (LLtW) ($r = 0.90–0.98$); a strong correlation between the leaf dry biomass (LDM) and the product of the compound leaf rachis length (RCL) by the length of the primary largest leaflet (LLtL) by the width of the primary largest leaflet (LLtW) ($r = 0.86–0.92$), and a strong correlation between the leaf dry biomass (LDM) and the product of the primary leaflet number (NLt) by the dry mass of the primary largest leaflet (LLtDM) ($r = 0.93–0.96$) for *Khaya senegalensis* (Figs. 4a–c).

Figure 4a, a1, b, b1, c, c1 respectively show the linear regression models as well as their successive polynomial models obtained between the dry foliar biomass and the product of the dimensions of the leaves in *Khaya senegalensis*. In the estimated leaf dry mass (LDM) of *Khaya senegalensis*, the regressions were all significant ($P = 0.0001$; $R^2 = 0.80–0.95$; $LDM = 0.004*NLt*LLtL*LLtW + 0.07$ and $\text{LOG}[LDM] = 1.07*\text{LOG}[NLt*LLtL*LLtW] - 2.74$, then $P = 0.0001$; $R^2 = 0.78–0.88$; $LDM = 0.001*RCL*LLtL*LLtW + 0.19$ and $\text{LOG}[LDM] = 0.75*\text{LOG}[RCL*LLtL*LLtW] - 2.14$, then $P = 0.0001$; $R^2 = 0.79–0.92$; $LDM = 0.89*NLt*LLtL*LLtW + 0.3$ and $\text{LOG}[LDM] = 0.89*\text{LOG}[NLt*LLtDM] + 0.01$).

In *Pterocarpus erinaceus*, Figs. 4d, d1, e, e1 show a strong correlation between the leaf dry biomass (LDM) and the product of the primary leaflet number (NLt) by the length of the primary largest leaflet (LLtL) and the width of the primary largest leaflet (LLtW) ($r = 0.90–0.96$); then between dry biomass (LDM) and the product of the rachis length (RCL) by the length of the primary largest leaflet (LLtL) by the width of the primary largest leaflet (LLtW) ($r = 0.83–0.99$). In *Pterocarpus erinaceus*, show that for the estimation of dry biomass, regressions were significant ($P = 0.0001$; $R^2 = 0.80–0.92$; $\text{LOG}[LDM] = 0.4*\text{LOG}[NLt*LLtL*LLtW] - 0.64$ and $\text{LOG}[LDM] = 0.12*(\text{LOG}[NLt*LLtL*LLtW])^2 - 0.004*\text{LOG}[NLt*LLtL*LLtW] - 0.35$, then $P = 0.0001$; $R^2 = 0.75–0.98$; $LDM = 0.15*[RCL$

Table 3 Influence of the three target species on the parameters evaluated

Parameters assessed	<i>Khaya senegalensis</i>	<i>Pterocarpus erinaceus</i>	<i>Parkia biglobosa</i>	<i>P > F</i>
IL (cm)	5.53 ± 0.7 ^a	4.71 ± 0.44 ^a	3.34 ± 0.44 ^b	0.0214
Min–Max	0.2–11.9	0.4–9.9	0.3–7.4	
ID (cm)	6.6 ± 0.41 ^a	4.8 ± 0.32 ^b	4.41 ± 0.1 ^b	0.0117
Min–Max	0.7–13.02	0.4–8.32	0.89–7.89	
VL (cm ³)	5.94 ± 1.73 ^a	4.67 ± 0.99 ^b	3.78 ± 1.24 ^c	0.00152
Min–Max	0.28–17.52	0.25–7.03	0.01–7.84	
IFM (g)	10.59 ± 1.68 ^a	9.9 ± 0.77 ^a	5.1 ± 1.06 ^c	0.0321
Min–Max	0.01–15.91	0.08–16.04	0.11–7.4	
IDM (g)	4.64 ± 0.76 ^a	4.6 ± 0.39 ^a	2.81 ± 0.62 ^b	0.01
Min–Max	0–7.28	0.03–7.94	0.04–4.65	
LL (cm)	8.49 ± 2.4 ^a	9.2 ± 2.28 ^a	0 ^c	0.0001
Min–Max	2–17.3	0.4–14.5	0	
LW (cm)	5.1 ± 0.66 ^a	5.51 ± 1.15 ^a	0 ^b	0.0467
Min–Max	1.1–6.3	0.2–9.2	0	
RCL (cm)	16.71 ± 2.28 ^a	11.99 ± 2.47 ^b	7.26 ± 3.01 ^c	0.001
Min–Max	0.5–36.5	0.7–23.7	0.3–39.6	
LLtL (cm)	11.79 ± 3.11 ^a	8.98 ± 2.77 ^b	8.33 ± 3.22 ^b	0.024
Min–Max	1.5–19.6	1.2–14.4	1.1–17.8	
LLtW (cm)	4.83 ± 1.21 ^b	6.55 ± 1.53 ^a	2.38 ± 0.59 ^c	0.001
Min–Max	0.6–13.6	1.2–9.4	0.2–4.3	
NLt	6.85 ± 3.19 ^a	6.87 ± 2.25 ^a	6.87 ± 0.18 ^a	0.782
Min–Max	3–23	3–12	3–30	
LSeLtL (cm)	0 ^b	0 ^b	1.38 ± 0.31 ^a	0.0001
Min–Max	0	0	0.2–2.5	
LSeLtW (cm)	0 ^b	0 ^b	0.38 ± 0.1 ^a	0.0001
Min–Max	0	0	0.2–0.8	
NSeLt	0 ^b	0 ^b	39.65 ± 6.81 ^a	0.0001
Min–Max	0	0	12–94	
LFM (g)	16.91 ± 1.61 ^a	11.45 ± 1.37 ^b	8.36 ± 1.95 ^c	0.00128
Min–Max	0.01–121	0.12–17.33	0.1–14.53	
LDM (g)	8.61 ± 0.8 ^a	7.6 ± 0.15 ^b	5.34 ± 2.64 ^c	0.0001
Min–Max	0–5.75	0.09–9.87	0.06–8.21	
LA (cm ²)	396.45 ± 79.93 ^a	154.51 ± 70.1 ^b	144.35 ± 47.93 ^b	0.0019
Min–Max	0.31–1922.3	0.76–388.5	1.13–361.9	

a, b and c: comparison using Student–Newman–Keuls tests; different letters in two successive columns on the same line imply a significant difference at the 95% threshold

IL (cm): length of internodes, *ID* (cm): diameter of internodes, *VL* (cm³): volume of internodes, *IFM* (g): fresh mass of internodes, *IDM* (g): dry mass of internodes, *LL* (cm): length of single leaves, *LW* (cm): width of single leaves, *RCL* (cm): rachis length of compound leaves, *LLtL* (cm): length of the largest leaflet of the compound leaf, *LLtW* (cm): width of the largest leaflet of the compound leaf, *NLt*: number of leaflets, *LSeLtL* (cm): length of the largest secondary leaflet of the bipinnate leaflet, *LSeLtW* (cm): width of the largest secondary leaflet of the bipinnate leaflet, *NSeLt*: number of secondary leaflets, *LFM* (g): fresh leaf mass, *LDM* (g): dry leaf mass, *LA* (cm²): leaf area, *Min*: minimum, *Max*: maximum

* $LLtL * LLtW + 0.14$ and $LOG [LDM] = 0.71 * LOG [RCL * LLtL * LLtW - 1.64]$.

In *Parkia biglobosa*, Fig. 4f, f1, g, g1 show a strong correlation between the leaf dry biomass (LDM) and the product of the number of bipinnate secondary leaflet (NSeLt) by the length of the largest secondary leaflet (LSeLtL) by the width

of the largest secondary leaflet (LSeLtW) by the number of primary leaflet (NLt) ($r = 0.95–0.98$); then between leaf dry biomass (LDM) and the product of the primary leaflet number (NLt) and the length of the primary largest leaflet (LLtL) and the width of the primary largest leaflet (LLtW) ($r = 0.92–0.99$).

Fig. 3 Relationship and linear regressions (a) then logarithmic model (a1) between dry biomass and internode volumes in *Khaya senegalensis*; relationship and linear regressions (b) then power model (b1) between dry biomass and internode volumes in *Pterocarpus erinaceus*, then linear regressions (c) then power model (c1) between dry biomass and internode volumes in *Parkia biglobosa*. Measured or active (grey dots), estimated or model (solid line) and 95% confidence interval (dotted and solid line)

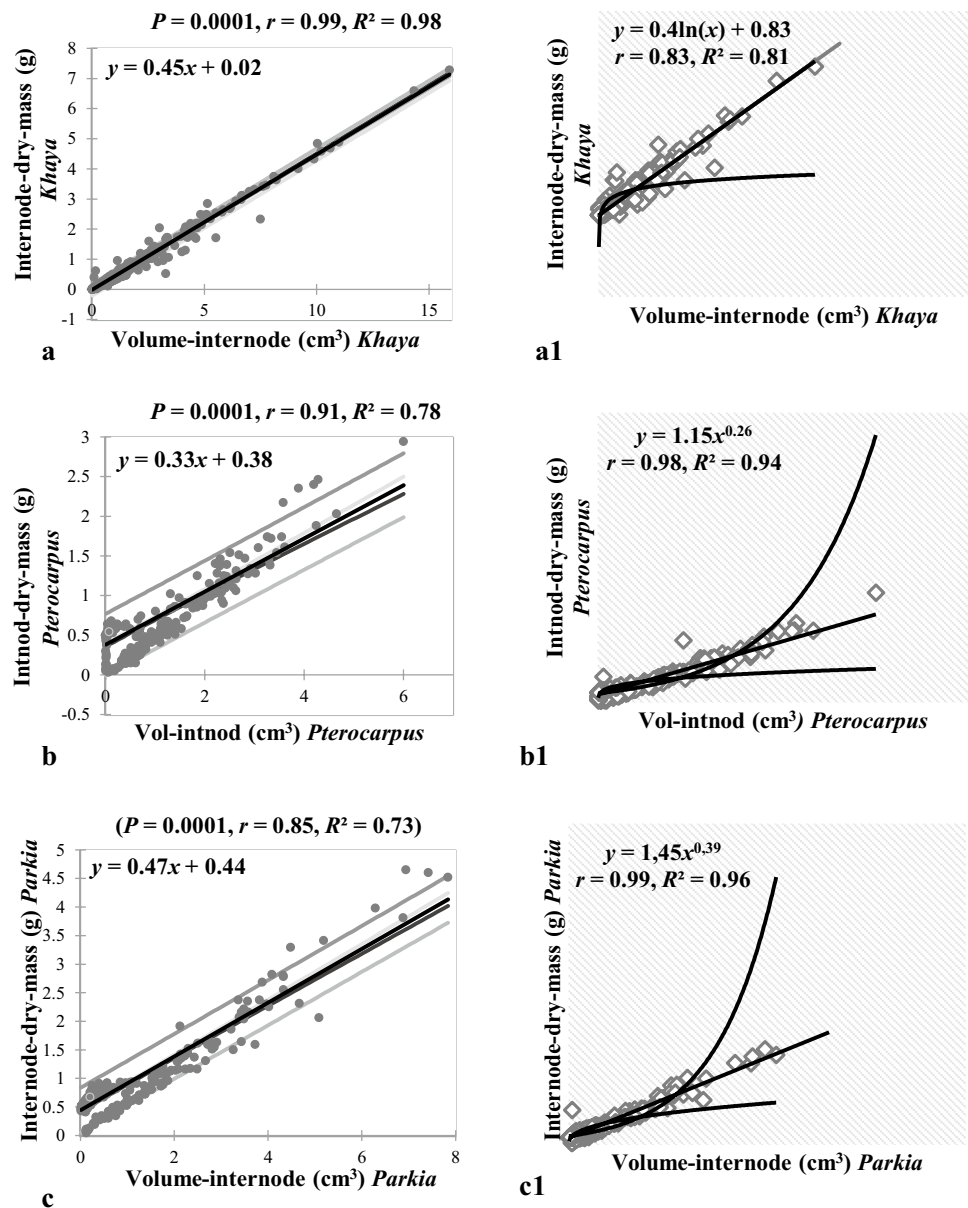


Figure 4f, f1, g, and g1, respectively, show the linear regression models as well as their successive polynomial models obtained between leaf dry biomass and the product of leaf, primary leaflet and secondary leaflet dimension in *Parkia biglobosa*. For the estimation of dry (LDM) leaf mass in *Parkia biglobosa*, the regressions were significant ($P = 0.0001$; $R^2 = 0.84$ – 0.96 ; $LDM = 0.012 * NSeLt * LSeLt * LSeLtW * NLt + 0.06$ and $LOG [LDM] = 0.23 * (LOG [NSeLt * LSeLt * LSeLtW * NLt])^2 - 0.4 * LOG [NSeLt * LSeLt * LSeLtW * NLt] - 0.11$; then $P = 0.0001$; $R^2 = 0.80$ – 0.97 ; $LDM = 0.016 * NLt * LLtL * LLtW + 0.3$ and $LOG [LDM] = 0.3 * (LOG [NLt * LLtL * LLtW])^2 - 0.65 * LOG [NLt * LLtL * LLtW] + 0.1$).

Estimation of leaf area from the product of leaf dimensions

The relationships, linear regression, polynomial and power models between leaf area and the product of leaf dimensions are presented in Fig. 5. In *Parkia biglobosa*, the results showed a high correlation and good power models with log-function transformed data compared to untransformed data (Fig. 5c1, d1). Figure Fig. 5a, a1 show a strong correlation between leaf area (LA) and the product of the primary leaflet number (NLt) by the length of the primary largest leaflet (LLtL) by the width of the primary largest leaflet (LLtW) ($r = 0.96$ – 0.98) in *Khaya senegalensis*. Figure 5b, indicate a

Fig. 4 Relationship and linear regressions between dry leaf biomass and the product of the number of primary leaflets and the length of the largest primary leaflet and the width of the largest primary leaflet **a**, then the product of the length of the rachis by the length of the largest primary leaflet by the width of the largest primary leaflet **b** and the product of the primary leaflets number by the dry mass of the largest primary leaflet **c** as well as their respective linear regression with a data logarithmic transformation (a1; b1 and c1) in *Khaya senegalensis*; the linear regression **d** and polynomial model (**d1**) between dry leaf biomass and the logarithm product of the number of primary leaflets and the length of the largest primary leaflet and the width of the largest primary leaflet, and the linear regressions between the dry leaf biomass then the product of the rachis length by the length of the largest primary leaflet by the width of the largest primary leaflet **e** and a data logarithmic transformation (**e1**) in *Pterocarpus erinaceus*; finally the linear regression with the normal data (**f** and **g**) then the polynomial model with a data logarithmic transformation (**f1** and **g1**) between dry leaf biomass and the product of the number of secondary leaflets and the length of the largest secondary leaflet and the width of the largest secondary leaflet and the number of primary leaflets (**f** and **f1**) then the product of the number of primary leaflets and the length of the primary largest leaflet and the width of the primary largest leaflet (**g** and **g1**) in *Parkia biglobosa*. Measured or active (grey dots), estimated or model (solid line) and 95% confidence interval (dashed and solid line)

strong correlation between the logarithm of leaf area (LA) and the product of the logarithm of the composite primary leaflet number (NLt) by the length of the primary longest leaflet of the composite leaf (LLtL) by the width of the primary longest leaflet of the composite leaf (LLtW) ($r=0.98$) in *Pterocarpus erinaceus*. Figures 5c, c1, d and d1, show a strong relationship between the leaf area (LA) and the product of the number of secondary leaflets of the bipinnate leaflet (NSeLt) by the length of the largest secondary leaflet of the bipinnate leaflet (LSeLtL) by the width of the largest secondary leaflet of the bipinnate leaflet (LSeLtW) by the number of primary leaflets of the compound leaf (NLt) ($r=0.91-0.99$); then between the leaf area (LA) and the product of the number of primary leaflets (NLt) by the length of the largest primary leaflet (LLtL) by the width of the largest primary leaflet (LLtW) ($r=0.96-0.99$) in *Parkia boglobosa*.

The results showed a significant linear regression for estimated leaf area (LA) in *Khaya senegalensis* ($P = 0.0001$; $R^2 = 0.92-0.94$; $\text{LOG [LA]} = 0.83 * \text{LOG [NLt * LLtL * LLtW]}$ and $\text{LOG [LA]} = 0.08 * (\text{LOG [NLt * LLtL * LLtW]})^2 + 1.13 * \text{LOG [NLt * LLtL * LLtW]} - 0.27$). For estimated leaf area (LA) in *Pterocarpus erinaceus*, the regressions were also significant ($P = 0.0001$; $R^2 = 0.95-0.96$; $\text{LOG [LA]} = 0.74 * [\text{NLt * LLtL * LLtW}] + 0.15$ and $\text{LOG [LA]} = 0.03 * (\text{LOG [NLt * LLtL * LLtW]})^2 + 0.65 * \text{LOG [NLt * LLtL * LLtW]} + 0.23$). The regressions for estimated leaf area (LA) in *Parkia biglobosa* were also significant ($P = 0.0001$; $R^2 = 0.91-0.99$; $\text{LA} = 0.13 * \text{NSeLt} * \text{LSeLt}$

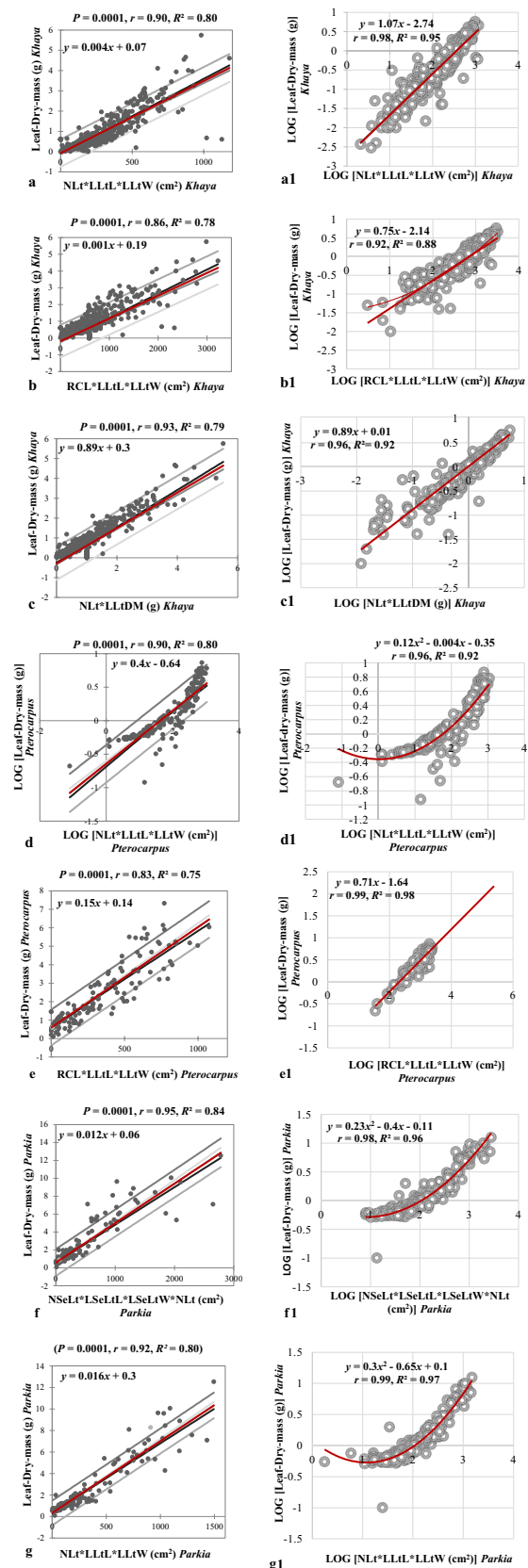
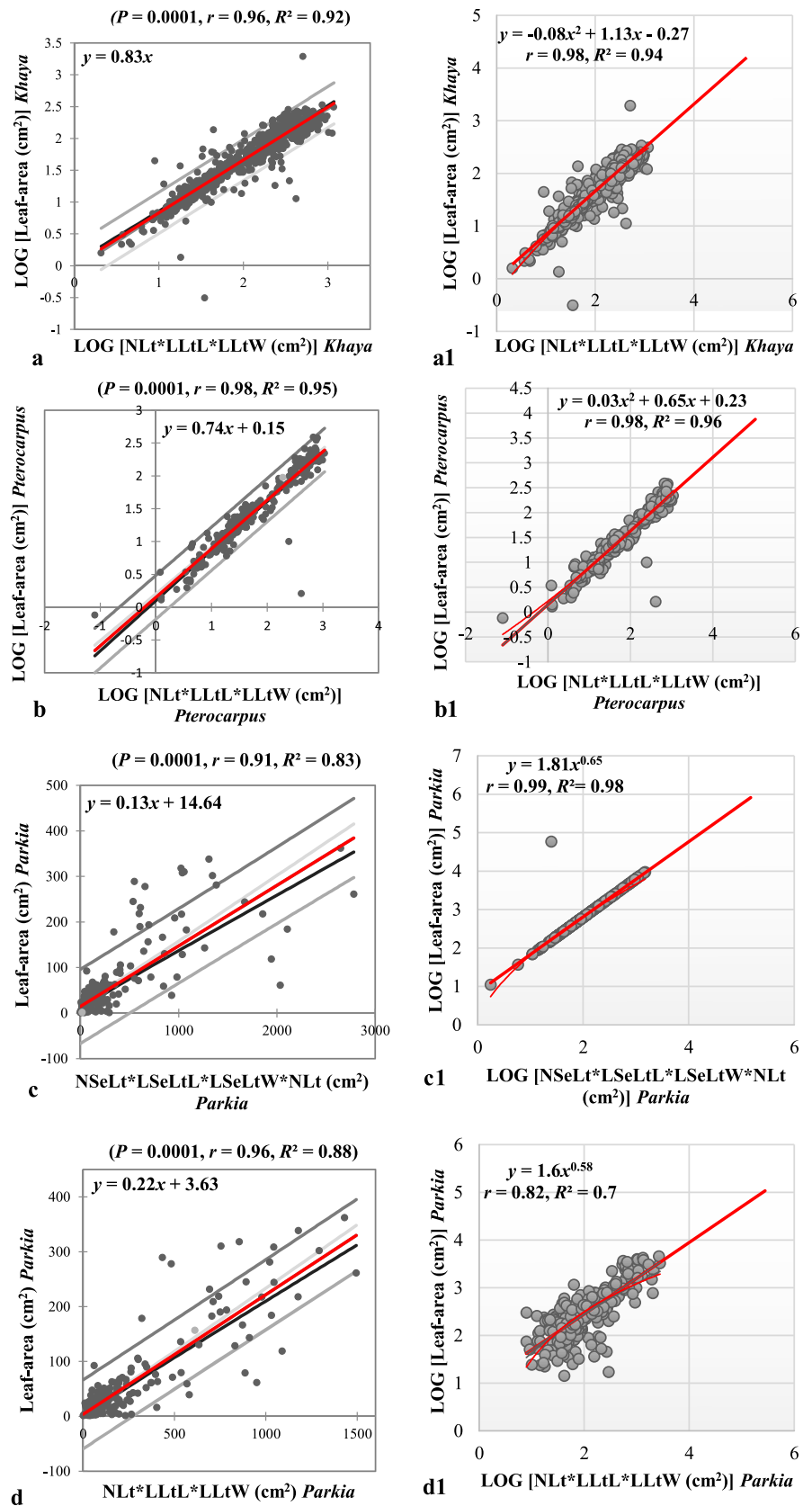


Fig. 5 Relationship and linear regression **a** then polynomial model (**a1**) between the leaf area and the logarithm product of the leaf dimensions *Khaya senegalensis*. The linear **b** and polynomial models (**b1**) between the leaf area and the logarithm product of the leaf dimensions in *Pterocarpus erinaceus*. Finally the linear regression with the normal data (**c** and **d**) then as well as their respective power model with a data logarithmic transformation (**c1** and **d1**) between the leaf area and the product of the leaf dimensions in *Parkia biglobosa*. Measured or active (dots), estimated or model (solid line) and 95% confidence interval (dashed and solid line)



$L*LSeLtW*NLt + 14.64$ and $LOG [LA] = 0.18*(LOG [NSeLt*LSeLtL*LSeLtW*NLt])^{0.65}$, then $P = 0.0001$; $R^2 = 0.7-0.88$; $LA = 0.22*NLt*LLtL*LLtW + 3.63$ and $LOG [LA] = 1.6*(LOG [Nlt*LLtL*LLtW])^{0.58}$.

Discussion

Like our study, many studies have been performed to establish reliable relationships between stem, leaf biomass and leaf area and leaf size in different plant species. The objective of the present work was to produce allometric equations from relationships between the dimensions of fresh internodes (length and diameter) and fresh leaves (length, width, number of leaflets, length of the rachis etc.) and the corresponding dry mass to facilitate the collection of field data in an agroforestry system.

Descriptive statistics and comparison using the Student–Newman–Keuls test of all variables assessed in each species showed that the parameters differ from one species to another ($P < 0.05$), except for the number of primary leaflets, which was statistically identical from one species to another. This variation is normal since each species has its own genetic program for architectural development (Hallé and Keller 2019). Moreover, these species differ considerably from a morphological point of view (size of leaves and stems). *Khaya senegalensis* is a compound-leaved Meliaceae, *Pterocarpus erinaceus* is a compound-leaved Fabaceae and *Parkia biglobosa* which has bipinnate compound leaves formerly classified as Mimosaceae was recently attributed to Fabaceae thanks to a phylogenetic study. The variable number of leaves was statistically identical from one species to the other; this may be explained by the fact that these species are compound-leaved species evolving in the same environment (savannah), plus, leaves were collected from individuals of identical age in the different species (6 months, 12 months, 24 months and wildings of the same size). Leroy et al. (2007) observed morphological differences between the leaves of *Acacia mangium*, *Tectona grandis*, *Hevea brasiliensis* and *Swietenia macrophylla*. as well as in the studies of Yu et al. (2020) on 15 grapevine species, Shi et al. (2019) on 4 plant types and He et al. (2020) on 6 Magnoliaceae species.

Estimation of the dry biomass of internodes based on their volume

We describe estimation of internode biomass from simple non-destructive measurements in the three target species with linear, logarithmic and power regressions including the volume of the internodes (i.e., the product of length times half the diameter squared or squared radius). After several combinations, the best models selected and chosen

had accurate and less dispersed residual errors. Like in teak and coffee, this relationship results from the synchronized or unsynchronized activity of terminal meristems (Tondjo et al. 2015; Okoma et al. 2016). In contrast to many studies that use the power law, we have combined a set of laws to allow the measurement collector free choice according to his convenience. Indeed, power models are used in case of intense imprecision of the residual dispersion to reduce the measurement error (Leroy et al. 2007; Antunes et al. 2008; Tondjo et al. 2015; Okoma et al. 2016); however, the linear models are endowed with a quick ease of use by hand and without the need for a calculator in our opinion.

All statistical relationships (correlation and coefficient of determination) found for models of dry biomass (IDM) of internodes on internodes volume (VL) were significant in *Khaya senegalensis* ($P = 0.0001$, $r = 0.99$, $R^2 = 0.98$ and $IDM = 0.45*VL + 0.02$; $r = 0.81$, $R^2 = 0.83$ and $IDM = 0.4*\ln(VL) + 0.83$); in *Pterocarpus erinaceus* ($P = 0.0001$, $r = 0.91$, $R^2 = 0.78$ and $IDM = 0.33*VL + 0.38$; $r = 0.98$, $R^2 = 0.94$ and $IDM = 1.15*VL^{0.26}$) and in *Parkia biglobosa* ($P = 0.0001$, $r = 0.85$, $R^2 = 0.73$ and $IDM = 0.47*VL + 0.44$; $r = 0.99$, $R^2 = 0.96$ and $IDM = 1.45*VL^{0.39}$). These results indicate that variation in the volume of internodes explains an average of 98% and 83% of the variability in dry biomass in *Khaya senegalensis*. The results also indicate that variation in internode volume explains on average 78% and 94% of the variability in dry biomass internode biomass in *Pterocarpus erinaceus*. Finally, these results show that the variation in volume explains on average 73% and 96% of the variability in dry biomass internode biomass in *Khaya senegalensis*. Generally, power models show the good correlation between the volume of internodes and their dry biomass (case of *Pterocarpus erinaceus* and *Parkia biglobosa*).

Estimation of dry leaf biomass from the product of leaf dimensions

To improve and refine the estimated leaf biomass in different ways, several additional variables such as the number of primary (NLt) and secondary (NSeLt) leaflets, the length and width of the largest primary (LLtL and LLtW) and secondary (LSeLtL and LSeLtW) leaflets and the rachis length of the compound leaves (RCL) were taken into account. In some cases, logarithmic transformation of the data was necessary to obtain accurate estimates.

We estimated leaf biomass using simple non-destructive measurements of leaf size in the three target species with linear and polynomial regressions including the product of the number of primary leaflets (NLt) and the length of the largest primary leaflet (LLtL) and the width of the largest primary leaflet (LLtW) (in *Khaya senegalensis* and *Pterocarpus erinaceus*) then the product of the secondary leaflet

number (NSeLt) and the length of the largest secondary leaflet (LSeLtL) and the width of the largest secondary leaflet (LSeLtW) and the number of primary leaflets (NLt) on the bipinnate compound leaf (in *Parkia biglobosa*). The power laws were not chosen here, because they presented bad models with large inaccuracies of residuals. Generally, power laws are used more when the different shapes and sizes of leaflets or leaves significantly influence the dispersion of errors (imprecise residuals) (Leroy et al. 2007; Antunes et al. 2008; Tondjo et al. 2015; Okoma et al. 2016), which was not the case in our study. The linear relationship between leaf biomass and leaf dimensions results from leaf expansion due to the intercalation of the meristems (Tondjo et al. 2015; Okoma et al. 2016). Huang et al (2019a; b; 2020) on Bamboo reported that dry mass, fresh mass and leaf area were correlated with each other when leaf dry mass is proportional to leaf fresh mass. Our study did not consider this experiment because it would require the destruction of the leaf organ to obtain one of these parameters. Also, Liu et al. (2020) and Lin et al (2020) showed for the first time that there is a significant relationship between leaf shape and the numerical values of the scaling exponents governing the scale of leaf dry mass to leaf area.

The statistical relationships (correlation and coefficient of determination) obtained for linear regressions and polynomial models of dry biomass (LDM) of leaves on the product of leaf size were significant. In *Khaya senegalensis*, the best models were obtained with dry biomass (LDM) and the product of the number of primary leaflets (NLt) and the length (LLtL) and width (LLtW) of the largest primary leaflet, and then with the product of the rachis length of the compound leaf (RCL) and the length (LLtL) and width (LLtW) of the largest primary leaflet, then with the product of the primary leaflet number (NLt) and the dry mass of the largest primary leaflet (LLtDM); the latter case requires the destruction of a small part of the leaf. In any case, a choice can be made between the all models offered. The best models were obtained with the logarithmic transformation of the data. The different resulting relationships are as follows: $P=0.0001$, $r=0.98$, $R^2=0.95$ and $\text{LOG [LDM]}=1.07*\text{LOG [NLt*LLtL*LLtW]}-2.74$; $P=0.0001$, $r=0.92$, $R^2=0.88$ and $\text{LOG [LDM]}=0.75*\text{LOG [RCL*LLtL*LLtW]}-2.14$; $P=0.0001$, $r=0.96$, $R^2=0.92$ and $\text{LOG [LDM]}=0.89*\text{LOG [NLt*LLtDM]}+0.01$.

In *Pterocarpus erinaceus*, the best regressions were obtained with the logarithmic transformation between the leaf dry biomass (LDM) and the product of the number of primary leaflets (NLt) and the length (LLtL) and width (LLtW) of the largest primary leaflet then with the product of the rachis length of the compound leaf (RCL) and the length (LLtL) and width (LLtW) of the largest primary leaflet. However, a choice will be taking to be made between these two models for the collection of field data.

The best models were the polynomial models obtained with the logarithmic transformation of the data. The different links and allometric equations proposed are as follows: $P=0.0001$, $r=0.96$, $R^2=0.92$ and $\text{LOG [LDM]}=0.12*\text{LOG [NLt*LLtL*LLtW]}^2-0.004*\text{LOG [NLt*LLtL*LLtW]}-0.35$; $P=0.0001$, $r=0.99$, $R^2=0.98$ and $\text{LOG [LDM]}=0.71*\text{LOG [RCL*LLtL*LLtW]}-1.64$.

In *Parkia biglobosa*, the best models for estimating dry biomass were obtained with logarithmic transformation of the variables. The logarithm of the leaf dry biomass is the product of the logarithm of the secondary leaflet number (NSeLt) by the length (LSeLtL) by width (LSeLtW) of the secondary leaflets by the primary leaflet number (NLt), or the product of the logarithm of the primary leaflet number (NLt) by the length (LLtL) by width (LLtW) of the primary leaflets. A choice will also have to be made between these proposed models for field data collection. The best models were the polynomial models obtained with the logarithmic transformation of the data. The different relationships and allometric equations obtained are as follows: $P=0.0001$, $r=0.98$, $R^2=0.96$ and $\text{LOG [LDM]}=0.23*\text{LOG [NSeLt*LSeLtL*LSeLtW*NLt]}^2-0.4*\text{LOG [NSeLt*LSeLtL*LSeLtW*NLt]}-0.11$; $P=0.0001$, $r=0.99$, $R^2=0.97$ and $\text{LOG [LDM]}=0.3*\text{LOG [NLt*LLtL*LLtW]}^2-0.65*\text{LOG [NLt*LLtL*LLtW]}+0.1$.

Note that the log transformation of the data often causes several data points to deviate from the predicted curves. This is due to the type of model chosen (polynomial or power). However, this does not affect the quality and accuracy of the model. Moreover, for a single estimate, at least two models are proposed; and thus in the field the scientist will be able to collect these data and estimate the parameters according to his choice of equation (linear or polynomial or power), which can facilitate his task and save time. But we rather recommend the models obtained with the transformed data (Polynomial and/or logarithmic), because of their precision (higher r and R squared than the linear models).

Estimation of leaf area from the product of leaf dimensions

The Montgomery equation (ME) generally describes a proportional relationship between leaf area (LA) and the product of leaf length (LL) and width (LW). That is, $LA=a*LL*LW$, where “a” is called the Montgomery coefficient. This equation has been successfully applied to estimate the surface area of many species with broad leaves but simple leaf shapes. However, how can this equation be used and validated on species with complex leaf shapes such as complex leaves? To exploit this equation, we have taken a broad approach by considering and taking into account the product of several types of leaf dimensions.

Like our study, several studies have been carried out to establish reliable relationships between leaf area and leaf size in different plant species: coffee (Okoma et al. 2016; Antunes et al. 2008), *Tectona grandis* (Tondjo et al. 2015; Leroy et al. 2007), *Acacia mangium*, *hevea brasiliensis* and *Swietenia macrophylla* (Leroy et al. 2007), chestnut (Serdar and Demirsoy 2006), strawberry (Demirsoy et al. 2005), peach (Demirsoy et al. 2004), *Typha latifolia* (Bianco et al. 2003), avocado, lotus plum, kiwi (Uzun and Celik 1999), grape (Elsner and Jubb 1988), etc. Our study is the first to estimate the leaf area of these three target species. It is one of the few studies conducted on species with compound and bipinnate leaves. Indeed, the majority of studies showing the proportionality of leaf area and leaf dimensions from the Montgomery equation are generally applied to simple and broad leaves. Several studies in China and elsewhere illustrate very well and in detail the positive and highly significant scaling relationship between leaf dimensions and the respective leaf areas observed. This is the case of the studies of Yu et al. (2019; 2020) on 12 species of Rosaceae and 15 species of vines respectively, of Shi et al. (2019; 2021) on four types of plants and Bamboos, of He et al. (2020) on six species of Magnoliaceae, of Huang et al. (2021) on *Phyllostachys edulis*, etc.

Like for the estimation of leaf biomass, several additional variables including the number of primary (NLt) and secondary (NSeLt) leaflets and the length and width of the largest primary (LLtL and LLtW) and secondary (LSeLtL and LSeLtW) leaflet were taken into account to increase the accuracy of the estimation. In some cases, logarithmic transformation of the variables was necessary to obtain more accurate models.

Leaf area (LA) was estimated from simple non-destructive measurements of leaf size in the three target species with linear regressions, polynomial and power models including the product of the number of primary leaflets (NLt) and the length of the largest primary leaflet (LLtL) and the width of the largest primary leaflet. (LLtW) (in *Khaya senegalensis* and *Pterocarpus erinaceus*) then the product of the secondary leaflet number (NSeLt) and the length of the largest secondary leaflet (LSeLtL) and the width of the largest secondary leaflet (LSeLtW) and by the number of primary leaflets (NLt) of the bipinnate compound leaf (in *Parkia biglobosa*). The models chosen and presented (linear, polynomial and power) are the best because of the minimal dispersion of errors despite the highly variable size and shape of primary and secondary leaflets. The best models were the polynomial models (*Khaya senegalensis* and *Pterocarpus erinaceus*) and power models (*Parkia biglobosa*) obtained with the logarithmic transformation of the data.

The statistical relationships obtained for models of leaf area on the product of leaf size were significant. In *Khaya senegalensis*, the best models were obtained with

the transformation of the variables, i.e., between the logarithm of the leaf area and the product of the logarithm of the number of primary leaflets (NLt) and the length (LLtL) and width (LLtW) of the largest primary leaflet. The best choice for field collection would be polynomial model with transformed data. The different relationships and equations are as follows: $P = 0.0001$, $r = 0.98$, $R^2 = 0.94$ and $\text{LOG [LA]} = 0.08 * \text{LOG [NLt * LLtL * LLtW]}^2 + 1.13 * \text{LOG [NLt * LLtL * LLtW]} - 0.27$.

Similarly for *Pterocarpus erinaceus*, the best models were also obtained with the transformation of the variables, i.e. between the logarithm of the leaf area and the product of the logarithm of the number of primary leaflets (NLt) and the length (LLtL) and width (LLtW) of the largest primary leaflet. The best choice for field collection would also be transformed data. The best choice for field collection would be polynomial model with transformed data. The different relationships and equations are as follows: $P = 0.0001$, $r = 0.98$, $R^2 = 0.95$ and $\text{LOG [LA]} = 0.03 * \text{LOG [NLt * LLtL * LLtW]}^2 + 0.65 * \text{LOG [NLt * LLtL * LLtW]} + 0.23$.

In *Parkia biglobosa*, the best models to estimate leaf area (LA) were also obtained with the data transformation. Leaf area (LA) is therefore equal to the product of the number of secondary leaflets (NSeLt) and the length (LSeLtL) and width (LSeLtW) of the largest secondary leaflet and the number of primary leaflets (NLt) or the product of the number of primary leaflets (NLt) and the length (LLtL) and width (LLtW) of the largest primary leaflet. The best choice for field collection would be a power model with transformed data. The different relationships and equations are as follows: $P = 0.0001$, $r = 0.99$, $R^2 = 0.98$, $\text{LOG [LA]} = 1.81 * \text{LOG [NSeLt * LSeLtL * LSeLtW * NLt]}^{0.65}$; $P = 0.0001$, $r = 0.82$, $R^2 = 0.7$ and $\text{LOG [LA]} = 1.6 * \text{LOG [NLt * LLtL * LLtW]}^{0.58}$. Leaf area is usually assessed in fruit physiology experiments and measured regularly in horticultural crop experiments where certain physiological phenomena such as light, photosynthesis, respiration, plant water consumption and transpiration are studied (Centritto et al. 2000; Gottschalk 1994; Kersteins and Hawes 1994; Picchioni and Weinbaum 1995). These results are the first obtained in these three species and will facilitate the collection of field data by researchers focused on these species because of their socio-economic importance.

Conclusion

A series of relationships concerning the dimensions of stem internodes (volume), simple and compound leaves (length and width) in three species with different types of leaves are proposed in this study. The simple stem, leaf biomass and leaf area prediction models developed for *Khaya*

senegalensis, *Pterocarpus erinaceus* and *Parkia biglobosa* can be used for both trees and seedlings as the data were collected on both juvenile and adult individuals. There were no significant differences between the estimates for each tree age used in each species. Therefore, the models can be reliably used for agronomic, physiological, structural, and functional modelling studies in all three species. Further, this study offers the possibility to select one or other of the different models depending on the accuracy of the stem and leaf biomass and the required leaf area and the time available for field measurements. In this way, organ mass and leaf area can be estimated using simple and easy measurements taken directly on the tree. To improve the accuracy of the estimates, separate allometric models for each tree age and for each category of axis would be desirable.

Author contribution statement BIA designed the methodology, took the experimental measurements, analyzed the data and wrote the paper. DSA and SAS supervised the work. JD, KHK, YPH, MJ and PDR coordinated the research project.

Acknowledgements This study was financed by the Ministry of Higher Education and Scientific Research of Côte d'Ivoire, the French Development Agency (AFD) and IRD (*Institut de Recherche pour le Développement*) in the framework of PRESeD-CI 2 (Renewed Partnership for Research for Development in Côte d'Ivoire) and C2D (Debt Reduction Contract) of the AMRUGE-CI project (Support for the Modernization and Reform of Universities and *Grandes Ecoles* of Côte d'Ivoire). The authors are grateful to the *Centre de Coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement* (CIRAD) for providing the technical equipment necessary to conduct the study.

Data availability The datasets generated during and/or analyzed in the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Declarations

Conflict of interest The authors have no conflict of interest to declare.


References

- Adjanohoun E (1964) Végétation des savanes et des rochers découverts en Côte d'Ivoire centrale. ORSTOM, Paris, 178 p. <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:15113>. Accessed on 25/07/2020.
- Adji BI, Akaffou SD, Kouassi KH, Houphouet YP, Duminil J, Sabatier S (2020) Influence of different environments on germination parameters and seedling morphology in *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss (Meliaceae). *Am J Plant Sci* 11:1579–1600. <https://doi.org/10.4236/ajps.2020.1110114>
- Akassimadou H, Yao K (2014) La variabilité climatique en Côte d'Ivoire: entre perception sociales et réponse agricole. *Cahier Agric* 14(6):533–540
- Antunes WC, Pompelli MF, Carretero DM, DaMatta FM (2008) Allometric models for non-destructive leaf area estimation in coffee (*Coffea arabica* and *Coffea canephora*). *Ann Appl Biol* 153:33–40
- Bianco S, Pitelli RA, Pitelli AMCM (2003) Estimativa da área foliar de *Typha latifolia* usando dimensões lineares do limbo foliar. *Planta Daninha* 21:257–261
- Centritto M, Loreto F, Massacci A, Pietrini F, Villani MC, Zacchine M (2000) Improved growth and water use efficiency of cherry saplings under reduced light intensity. *Ecol Res* 15(4):385–392
- De Reffye P, Hu B (2003) Relevant choices in botany and mathematics for building efficient dynamic plant growth models: the GreenLab case. In: Hu B, Jaeger M (eds) *Plant growth models and applications*. Tsinghua University Press/Springer, Beijing/Berlin, pp 87–107
- Demirsoy H (2009) Leaf area estimation in some species of fruit tree by using models as a non destructive method. *Fruits* 64(1):45–51
- Demirsoy H, Demirsoy L, Uzun S, Ersoy B (2004) Non-destructive leaf area estimation in Peach. *Eur J Hort Sci* 69(4):S.144-S.146
- Demirsoy H, Demirsoy L, Ozturk A (2005) Improved model for the nondestructive estimation of strawberry leaf area. *Fruits* 60(1):69–73
- Diao J, Reffye D, Lei X, Guo H, Letort V (2011) Simulation of the topological development of young eucalyptus using a stochastic model and sampling measurement strategy. *Comput Electron Agric* 80:105–114. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.10.019>
- Djaha JBA, N'da AAA, Koffi EK, Ballo CK, Coulibaly M (2012) Croissance et aptitude au greffage de deux génotypes d'anacardier (*Anacardium occidentale* L.) élites utilisées comme porte-greffe en Côte d'Ivoire. *Int J Biol Chem Sci* 6: 1453–1466. <http://ajol.info/index.php/ijbcs.10.4314/ijbcs.v6i4.5>
- Dumenu WK (2019) Assessing the impact of felling/export ban and CITES designation on exploitation of African rosewood (*Pterocarpus erinaceus*). *Biol Conserv* 236:124–133. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.05.044>
- Elsner EA, Jubb GL (1988) Leaf area estimation of concord grape leaves from simple linear measurements. *Am J Enol Vitic* 39(1):95–97
- Ettien DJB (2004) Intensification de la production d'igname (*Dioscorea spp*) par la fertilisation minérale et l'identification de nouvelles variétés en zone forestière et savanicole de Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat unique en science de la terre, option Agro-pédologie. Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire. 187 p. <https://inventiv1.uvci.edu.ci/record/7548>. Accessed on 14/06/2020
- Fourcaud T, Zhang XP, Stokes A, Lambers H, Koerner C (2008) Plant growth modelling and applications: the increasing importance of plant architecture in growth models. *Ann Bot* 101:1053–1063
- Gaoue OG, Ticktin T (2008) Impacts of bark and foliage harvest on *Khaya senegalensis* (Meliaceae) reproductive performance in Benin. *J Appl Ecol* 45:34–40. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2007.01381.x>
- Goba AE, Koffi G, Raoul SS, Leonie CK, Yeboa AK (2019) Structure démographique et régénération naturelle des peuplements naturels de *Pterocarpus erinaceus* Poir. (Fabaceae) des savanes de Côte d'Ivoire. *Bois Et Forêt Des Tropiques* 34(1):5–14
- Godin C, Caraglio Y (1998) A multiscale model of plant topological structures. *J Theor Biol* 191:1–46
- Gottschalk KW (1994) Shade, leaf growth and crown development of *Quercus rubra*, *Quercus velutina*, *Prunus serotina* and *Acer rubrum* seedlings. *Tree Physiol* 14(7–9):735–749
- Hallé F, Keller R (2019) Mais d'où viennent les plantes? Actes sud. ISBN: 978-2-330-068775-2, pp 179. <https://www.actes-sud.fr/node/68060>. Accessed on 11/09/2020
- He J, Reddy GVP, Liu M, Shi P (2020) A general formula for calculating surface area of the similarly shaped leaves: evidence from six Magnoliaceae species. *Global Ecol Conserv* 23:e01129. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01129>
- Héroult B, Anatole KN, Nklo O, Assandé A, Fabrice B, Brahim A, Doua-Bi Y, Koffi Y, Koffi KJC, Konaté I, Tiéoulé F, Wourro F,

- Zo-Bi IC, Louppe D (2020) The long-term performance of 35 tree species of sudanian West Africa in pure and mixed plantings. *For Ecol Manag* 468:118–171. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118171>
- Houndonougbo JSH, Kassa B, Mensah S, Salako VK, Glèlè-Kakaï R, Assogbadjo AE (2020) A global systematic review on conservation and domestication of *Parkia biglobosa* (Jacq.) R. Br. ex G. Don, an indigenous fruit tree species in Sub-Sahara African traditional parklands: current knowledge and future directions. *Gen Resour Crop Evolut* 67:1051–1066. <https://doi.org/10.1007/s10722-020-00892-w>
- Huang W, Su X, Ratkowsky DA, Niklas KJ, Gielis J, Shi P (2019b) The scaling relationships of leaf biomass vs leaf surface area of 12 bamboo species. *Glob Ecol Conserv* 20:e00793. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00793>
- Huang W, Ratkowsky DA, Hui C, Wang P, Su J, Shi P (2019a) Leaf fresh weight versus dry weight: which is better for describing the scaling relationship between leaf biomass and leaf area for broad-leaved plants? *Forests* 10:256. <https://doi.org/10.3390/f10030256>
- Huang W, Reddy GVP, Li Y, Larsen JB, Shi P (2020) Increase in absolute leaf water content tends to keep pace with that of leaf dry mass—evidence from bamboo plants. *Symmetry* 12(8):1–10. <https://doi.org/10.3390/sym12081345>
- Huang L, Niinemets Ü, Ma J, Schrader J, Wang R, Shi P (2021) Plant age has a minor effect on non-destructive leaf area calculations in Moso bamboo (*Phyllostachys edulis*). *Symmetry* 13:369. <https://doi.org/10.3390/sym13030369>
- Kersteins G, Hawes CW (1994) Response of growth and carbon allocation to elevated CO₂ in young cherry (*Prunus avium* L) saplings in relation to root environment. *New Phytol* 128(4):607–614
- Leroy C, Saint-Andre L, Auclair D (2007) Practical methods for non-destructive measurement of tree leaf area. *Agrofor Syst* 71:99–108. <https://doi.org/10.1007/s10457-007-9077-2>
- Letort V, Sabatier S, Okoma MP, Jaeger M, Reffye DR (2020) Internal trophic pressure, a regulator of plant development? Insights from a stochastic functional–structural plant growth model applied to *Coffea* trees. *Ann Bot* 126:687–699. <https://doi.org/10.1093/aob/mcaa023>
- Lin S, Niklas KJ, Wan Y, Holscher D, Hui C, Ding Y, Shi P (2020) Leaf shape influences the scaling of leaf dry mass vs. area: a test case using bamboos. *Ann for Sci* 77:11. <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0911-2>
- Liu M, Niklas KJ, Niinemets Ü, Hölscher D, Chen L, Shi P (2020) Comparison of the scaling relationships of leaf biomass versus surface area between spring and summer for two deciduous tree species. *Forests* 11:1010. <https://doi.org/10.3390/f11091010>
- Louppe D, Ouattara N (1996) Les arboretums d'espèces locales en Nord Côte d'Ivoire. IDEFOR, pp 14. <http://agritrop.cirad.fr/581418>. Accessed on 18/03/2020.
- Marron N, Villar M, Dreyer E, Delay D, Boudouresque E, Petit J-M, Delmotte FM, Guehl J-M, Brignolas F (2005) Diversity of leaf traits related to productivity in 31 *Populus deltoides* x *Populus nigra* clones. *Tree Physiol* 25:425–435
- N'cho BS (1991). Modélisation de l'accès des racines de maïs (*Zea mays*) à l'azote. Expérimentation au champ en Centre Côte d'Ivoire. Mémoire de DIAT-ESAT, Montpellier (France) 22p
- Okoma P, Akaffou S, De Reffye P, Hamon P, Hamon S, Konan O, Kouassi KH, Legnate H, Letort V, Sabatier S (2016) Estimation of stem and leaf dry biomass using a non-destructive method applied to African *Coffea* species. *Agrofor Syst* 92(3):667–675. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-0031-z>
- Picchioni GA, Weinbaum SA (1995) Retention and the kinetics of uptake and export of foliage-applied, labeled boron by apple, pear, prune, and sweet cherry leaves. *J Am Soc Hort Sci* 120(1):868
- Pinto AC, Rodrigues TJD, Barbosa JC, Leite IC (2004) Leaf area prediction models for *Zinnia elegans* Jacq., *Zinnia haageana* Regel. and “profusion cherry.” *Sci Agric* 61:47–52
- Rasband WS (2014) ImageJ. U.S. National Institutes of Health, Bethesda. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5554542/>. Accessed on 7/01/2020
- Reffye DP, Hu B, Kang M, Letort V, Jaeger M (2021) Two decades of research with the GreenLab model in agronomy. *Ann Bot* 127:281–295. <https://doi.org/10.1093/aob/mcaa172>
- Séka K, Diallo AH, Kouassi NK, Aké S (2009) Incidence du Yam mosaic virus (YMV) et du Cucumber mosaic virus (CMV) sur des variétés de *Dioscorea* spp. Cultivées dans les régions de Bouaké et de Toumodi en Côte d'Ivoire. *Int J Biol Chem Sci* 3(4):694–703
- Seleznayova AN, Greer DH (2001) Effects of temperature and leaf position on leaf area expansion of Kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) shoots: development of a modeling framework. *Ann Bot* 88:605–615
- Serdar U, Demirsoy H (2006) Non-destructive leaf area estimation in chestnut. *Sci Hortic* 108:227–230
- Shi P, Liu M, Yu X, Gielis J, Ratkowsky DA (2019) Proportional relationship between leaf area and the product of leaf length width of four types of special leaf shapes. *Forests* 10:178. <https://doi.org/10.3390/f10020178>
- Shi P, Li Y, Niinemets Ü, Olson E, Schrader J (2021) Influence of leaf shape on the scaling of leaf surface area and length in bamboo plants. *Trees Struct Funct* 35:709–715. <https://doi.org/10.1007/s00468-020-02058-8>
- Tondjo K, Brancheriau L, Sabatier SA, Kokutse AD, Akossou A, Kokou K, Fourcaud T (2015) Non-destructive measurement of leaf area and dry biomass for estimating photosynthesis production in *Tectona grandis*. *Trees*. <https://doi.org/10.1007/s00468-015-1227>
- Tondjo K, Brancheriau L, Sabatier S, Kokutse AD, Kokou K, Jaeger M, De Reffye P, Fourcaud T (2018) Stochastic modelling of tree architecture and biomass allocation: application to teak (*Tectona grandis* L. f.), a tree species with polycyclic growth and leaf neof ormation. *Ann Bot*. <https://doi.org/10.1093/aob/mcy040>
- Uzun SC, Elik H (1999) Leaf area prediction models (uzc_elik-1) for different horticultural plants. *Tr J Agric* for 23:645–650
- Westoby M, Wright IJ (2003) The leaf size-twig size spectrum and its relationship to other important spectra of variation among species. *Oecologia* 135:621–628
- Westoby M, Falster DS, Moles AT, Vesk PA, Wright IJ (2002) Plant ecological strategies: some leading dimensions of variation between species. *Annu Rev Ecol Syst* 33:125–159
- Yu X, Hui C, Sandhu HS, Lin Z, Shi P (2019) Scaling Relationships between leaf shape and area of 12 Rosaceae Species. *Symmetry* 11:1255. <https://doi.org/10.3390/sym11101255>
- Yu X, Shi P, Schrader J, Niklas KJ (2020) Nondestructive estimation of leaf area for 15 species of vines with different leaf shapes. *Am J Bot* 107(11):1481–1490. <https://doi.org/10.1002/ajb2.1560>

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Authors and Affiliations

Beda Innocent Adji^{1,2}  · Doffou Sélastique Akaffou¹ · Kouadio Henri Kouassi¹ · Yao Patrice Houphouet¹ · Philippe De Reffye² · Jérôme Duminil³ · Marc Jaeger² · Sylvie Sabatier²

¹ Université Jean Lorougnon Guédé, Agroforestry UFR, BP 150, Daloa, Côte d'Ivoire

³ IRD, UMR-DIADE, DIADE, CIRAD, Université Montpellier, Cedex 5 Montpellier, France

² CIRAD, UMR AMAP, CIRAD, CNRS, INRA, IRD Université Montpellier, 34398 Montpellier, France

PUBLICATION 5

Beda Innocent Adji, Dofou Sélastique Akaffou and Sylvie Sabatier. 2021.

ECOLOGICAL ENVIRONMENT EFFECTS ON GERMINATION AND SEEDLING MORPHOLOGY IN *PARKIA BIGLOBOSA* IN NURSERY (COTE D'IVOIRE) AND GREENHOUSE (FRANCE). *International Journal of Horticulture, Agriculture and Food Science*, 5(5), pp. 1-13, ISSN: 2456-8635. <https://dx.doi.org/10.22161/ijhaf.5.5.1>



HAL
open science

Ecological environment effects on germination and seedling morphology in *Parkia biglobosa* in nursery (Côte d'Ivoire) and greenhouse (France)

Beda Innocent Adji, Sélastique Doffou Akaffou, Sylvie-Annabel Sabatier

► To cite this version:

Beda Innocent Adji, Sélastique Doffou Akaffou, Sylvie-Annabel Sabatier. Ecological environment effects on germination and seedling morphology in *Parkia biglobosa* in nursery (Côte d'Ivoire) and greenhouse (France). *International Journal of Horticulture, Agriculture and Food science, AI Publications*, 2021, 5 (5), pp.01 - 13. 10.22161/ijhaf.5.5.1 . hal-03423951

HAL Id: hal-03423951

<https://hal.inrae.fr/hal-03423951>

Submitted on 10 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution| 4.0 International License

Ecological environment effects on germination and seedling morphology in *Parkia biglobosa* in nursery (Côte d'Ivoire) and greenhouse (France)

Beda Innocent Adji^{1,2*}, Doffou Sélastique Akaffou², Sylvie Sabatier¹

¹CIRAD, UMR AMAP, F-34398 Montpellier, France

²Université Jean Lorougnon Guédé, Agroforestry UFR, Department for Seeds and Seedlings Production, BP 150, Daloa, Côte d'Ivoire

Received: 20 Aug 2020; Received in revised form: 15 Sep 2021; Accepted: 25 Sep 2021; Available online: 01 Oct 2021

©2021 The Author(s). Published by AI Publications. This is an open access article under the CC BY license

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Abstract— *Néré* (*Parkia biglobosa*) is a wild species preferred and overexploited for its multiple uses by rural populations in Sub-Saharan Africa. The study of its germination and seedlings could constitute a prerequisite for its domestication, necessary for its conservation. This study aimed to assess the germination and morphology of seedlings taking into account distinct habitats from its natural environment. A total of 2160 seeds from different mother plants and 540 seedlings from germination were selected and evaluated. The trials were conducted on three sites (two nurseries in Côte d'Ivoire vs one greenhouse in France) with different microclimates. The results showed that the larger the mother trees are, the larger the seeds they produce, which in turn generate more vigorous seedlings. This study showed that the species grows better in a milder environment that is different from its region of origin (fertile soil with a stable or humid tropical climate: Montpellier greenhouse and Daloa nursery). Overall, parent trees did not statistically influence each germination and seedling development parameter for the three sites combined ($P > 0.05$). However, analysis of variance showed that germination and seedling development parameters differed between experimental sites ($P < 0.05$). These results are useful and could be used as decision support tools to guide conservation (domestication) and agroforestry programmes based on *Parkia biglobosa*. This study could be extended to other endangered species in order to preserve biodiversity.

Keywords— *Parkia biglobosa*, environments, seed germination, seedling morphology.

I. INTRODUCTION

The existence of many species is threatened by poverty combined with a galloping demography in most tropical countries (Chupezi et al. 2009; Houndonougbo et al. 2020). Indeed, phylogenetic resources, in particular native forest, fruit and agroforestry species constitute an important source of subsistence and income for rural populations. In Africa, studies have shown that around 55% of plant species are endangered in forests, of which 10% are already extinct in the wild (Aké 1999; Maréchal et al. 2014). As a scientific challenge, it seems urgent to develop conservation strategies to compensate for the ever-increasing pressures on certain species that could lead to their extinctions, while taking human needs into account. In African savannah zone, trees and shrubs play a

key role in the ecological balance in the face of the advance of the desert (Maazou et al. 2017). These trees are also the main source of goods and services essential to populations (Avana-Tientcheu et al. 2019). However, these trees are overexploited for their multiple roles (food, medicine, timber and firewood, cultural, rituals etc.) by the populations, but also threatened mainly by the strong demography, climatic variations and systems of land use (Maponmetsem et al. 2011; Segla et al. 2016; Dumenu 2019). In Côte d'Ivoire, the most important among these savannah tree species are savannah Iroko (*Chlorophora regia* A. Chev.), Karité (*Vitellaria paradoxa* CF Gaertn), Rônier (*Borassusaethiopum* Mart.), Caïllédrat (*Khaya senegalensis* Desr. A. Juss), Vène (*Pterocarpus*

*erinaceus*Poir.) And Néré (*Parkia biglobosa* Jacq. Benth). We focus on this last species (*Parkia biglobosa*).

Parkia biglobosa of the Fabaceae family and of the Mimosoideae subfamily is a nourishing species with multiple functions (food, medicine, energy, culture, ritual, soil restoration: leguminous) whose economic, sociocultural, nutritional and energetic importance, medicinal and agroforestry has been widely documented in West Africa (Sina 2006; Koura et al. 2013; Maisharou and Larwanou 2015; Maazou et al. 2017). The species is distributed from Senegal to Uganda and is highly valued for its seeds fermented in "Soumbara" or African mustard; a very nutritious and highly prized product to enhance the taste of various dishes in many Sahelian countries (Azokpota et al. 2006). Likewise, the pulp of néré seeds is eaten directly or combined with wheat flour, corn or millet to make donuts (Avana-Tientcheu et al. 2019). Néré seeds increase the protein intake of the diet of rural populations in Sudano-Sahelian areas, which is mainly made up of cereals (Maponmetsem et al. 2011; Eba'a et al. 2013).

Despite its important socio-economic role and the threat to the genetic diversity of its stands, *Parkia biglobosa* is so far in the wild and few studies are available on its regeneration, conservation and sustainable management. In our opinion, taking human needs (food security) into account in developing a strategy for the sustainable management of the species should also consider its domestication (artificial regeneration). This domestication could open up long prospects for in-depth research, in particular on the efficient use of its agroforestry potential and its conservation. In this current context of climate change, the study of the germination and development of seedlings of this species with respect to a changing environment could appear as a good start to its domestication in quantity and quality. Several research questions were developed to specify the objectives of our study. These are: (i) Could the ever-changing environment have an effect on seed germination and seedling growth? (ii) are the dendrometric characteristics of the mother plant (ideal choice of seed trees) necessary to obtain a good

germination rate and vigorous seedlings? (iii) is the choice of vigorous seedlings resistant to climatic stress necessary? (iv) do seedlings of this species adapt to different types of environment? (v) could the germination or morphology parameters of the seedlings guide the choice of an environment conducive to the implementation of an agroforestry program based on *Parkia biglobosa*? etc. This study was carried out in an attempt to answer all of these questions. The objective of this study is to contribute to the conservation of *Parkia biglobosa* by its domestication on a large scale in Côte d'Ivoire, taking into account environments foreign to its natural environment. Specifically, it involves (1) testing its adaptive power to different new climates, (2) evaluating the effect of three distinct environments on the germination of its seeds and the development of its seedlings and (3) of evaluate the effect of characteristics of mother plants on the germination of its seeds and the development of its seedlings.

II. MATERIAL AND METHODS

Plant material

The plant material is composed firstly of seeds obtained after dehulling of ripe fruits (figure 1a), from six distinct mother trees spaced about 400 m apart in the same stand of *Parkia biglobosa* and secondly of three-month-old seedlings (figure 1b), resulting from the germination of seeds harvested under the six mother trees. All seeds were collected at the same time in late April 2019 from trees in good physiological condition at the experimental station (DeFo) of the CNRA (*Centre National de Recherche Agronomique*) in the Korhogo department of Côte d'Ivoire. The dendrometric characteristics of the mother trees and seeds are listed in Table 1. The plant material used is the property of the CNRA of Côte d'Ivoire and the authorisation to use this plant material was given to us within the framework of this study thanks to a partnership agreement signed and available on request between the said structure and our study project (EFISA).



Fig. 1 Images of hulling, sorting of healthy seeds and measurement of the dimensions of each seed (a) and then of three-month-old seedlings in the greenhouse.

Table 1 Dendrometric characteristics of the mother trees and seeds of *Parkia biglobosa* used

Mother trees	DBH (cm)	H (m)	Age (year)	GPS coordinates		Number of seeds	Seed mass (g)		
				Longitude	Latitude		Mini	Maxi	Mean
1	29.30	10	20	-5.54872 W	9.56728 N	360	0.17	0.24	0.26 ± 0.04 a
2	16.24	6.5	14	-5.54763 W	9.56644 N	360	0.09	0.28	0.21 ± 0.04b
3	34.08	16.5	20	-5.55056 W	9.56873 N	360	0.17	0.27	0.23 ± 0.02ab
4	13.54	8.5	12	-5.54908 W	9.56742 N	360	0.14	0.33	0.20 ± 0.05b
5	22.45	12.5	20	-5.55097 W	9.5687 N	360	0.11	0.27	0.19 ± 0.02 b
6	36.94	15.5	20	-5.55094 W	9.55686 N	360	0.21	0.31	0.26 ± 0.02a
Pr > F							0.003		

DBH = Diameter at chest height in centimetres; H = Height in metres; W = West; N = North; Mini = Minimum in grams; Maxi = Maximum in grams

III. METHODS

Study sites

The trials were implemented from May to September 2019 in three sites, two in Côte d'Ivoire and one in France with different microclimates. Of the two sites in Côte d'Ivoire, one was at the CNRA forest experimental station (hereafter DeFo: *Développement des forêts*) in

Korhogo, and the other at the UJLoG (*Université Jean Lorougnon Guédé*) University in Daloa. The trial in France took place in a controlled environment, in Greenhouse 8 at CIRAD (The French agricultural research and international cooperation organization working for the sustainable development of tropical and Mediterranean regions) in Montpellier. The characteristics of the study sites are listed in Table 2.

Table 2 Geographical location and characteristics of study sites (Millan 2016, Akaffou et al. 2019, Hérault et al. 2020).

Study sites or Environments	Coordinates	Vegetation	Climate	Temperature	Rainfall (mm/year)	Soil type
Korhogo (DeFo)	9°570'80556''N 5°542'88889''W	Clear forest (wooded and grassy)	Tropical dry	26.6 – 35.7 °C	817 - 1216	Ferruginous (90%) and Ferralitic (10%) superficial gravelly soil, deep gravel with a heavy texture, low in organic

		savannah)				matter, highly desaturated.
Daloa (UJLoG)	6° 909'6363''N 6°438'1157''W	Dense rain forest	Wet tropical (sub-equatorial)	21 – 34 °C	1000 - 1900	Ferralitic, deep, acidic and desaturated in exchangeable bases, rich in organic matter
Montpellier (Greenhouse)	43°64981'N 3°86842'W	in the greenhouse	in the greenhouse ^e	24 °C (night) - 32 °C (day)	10 cm ³ per week	Mixture of Substrate Soil 1, Neuhaus N2 Bio, Tref Rice CIRAD 2 and extra-silice sand from biot

C° = degrees Celsius; mm = millimetre; **Substrate 1** =Iron, trace elements, perlite and coconut fibre; **Neuhaus N2 Bio** =vegetable co-composting, blond and black peat; **Tref Rice CIRAD 2** = clay, volcanic sand, perlite no. 2, coconut, Irish white peat and fine blond peat

Setting up the tests

Seed harvesting

Mature fruits were harvested in April and May 2019 on the mother trees using long wooden sticks forks attached or by knocking the top of the tree with stones. The mature fruit collected under each mother tree was husked by hand to remove the thorny shells from the seeds. The seeds were then divided into three batches. Each batch contained seeds from all six mother trees, i.e. 120 healthy seeds were selected per mother tree and per study site after sorting all the seeds collected (120 seeds x 6 mother trees x 3 test sites giving a total of 2,160 seeds of *Parkia biglobosa*).

Preparation of the trials and equipment

Environment 1 and 2: Korhogo and Daloa Nurseries

Polyethylene black bags with drainage holes measuring 20 x 10 cm were filled with local soil and arranged in one block comprising six sub-blocks. Each sub-block was labelled with the mother trees serial number and geographic coordinates and contained seeds harvested on and under one mother tree. Each sub-block contained 60 bags of soil prepared to receive two seeds each. The seeds from each mother tree were soaked in water for 24 hours to break seed dormancy and then sowed directly at a depth of approximately 2 cm in the bags at a rate of two seeds per bag. Before planting, the seeds were treated with granulated FURADAN to control rodents and after seedling emergence, the pre-leaves were treated with DECIS to limit insects' attacks. Nursery maintenance consisted of daily watering and manual weeding.

Environment 3: CIRAD greenhouse in Montpellier

Polyester black pots with drainage holes measuring 30 x 15 cm (figure 1b) were filled with a mixture of potting compost as specified above (Table 2). The pots were arranged in labelled blocks and sub-blocks in metal bins arranged in the same way as in Korhogo and Daloa. The seeds were sown in the same way as those from the other two sites in Côte d'Ivoire. Biological protection consisted of treatment with BIOBEST against greenhouse whiteflies. The pots were watered daily (10 cm³ per week). all the pots occupied an area of about 12 m².

Data Collection

Seeds germination and seedling development parameters

A total of 2160 seeds were evaluated for the entire study. 120 seeds per mother tree (constituting a sub-block) were evaluated per study site (120 x 6 = 720 seeds in total on each site). However, a total of 540 seedlings were sorted and then evaluated for this entire study. The morphology of 30 vigorous and three-month-old seedlings resulting from the germination of the seeds of each mother tree (in each sub-block) was evaluated on each study site (30 x 6 = 180 seedlings in total for each site of study). All morphological parameters were measured using a ruler graduated in centimetres and an electronic caliper in millimeter. Five germination parameters and nine development parameters were evaluated, there are recorded in Table 3.

Table 3 Germination development parameters evaluated

	Parameters	Definitions
Germination parameters	1-Waiting time or latency time	The time it takes for the first seed to germinate from the sowing of all the seeds(Amani et al. 2015; Douma et al. 2019)
	2-Germination delay	The period between the sowing of each seed and the appearance of each seedling (N'golo et al. 2018; Douma et al. 2019);
	3-Germination speed	The average time needed until 50% of the seeds have germinated (Berka and Abdelkader 2001; Diatta et al. 2009; Douma et al. 2019);
	4-Spreading time or germination duration	The period between germination of the first seed and the last seed (Amani et al. 2015; Douma et al. 2019);
	5-Germination rate	The number of seeds sprouted divided by the number of total seeds sprouted, expressed as a percentage (Zerbo et al. 2010; Gorgon et al. 2015; Akaffou et al. 2019).
Development parameters	1-Seedling height (SH)	The length between the collar and the apex of the seedling
	2-Diameter at the collar of the seedling (Dcol)	The base thickness of the main stem of the seedling
	3-Number of main leaves (LN°)	The number of main leaves on the main stem of the seedling
	4-Main leaf length (LL)	The length from the beginning of the petiole to the end of the primary rachis of the compound leaves on the main stem of the seedling
	5-Main leaf width (LW)	The width of the main compound leaf or the line connecting the tip of two opposite leaflets perpendicular to the primary rachis at the center of the main compound leaf
	6-Number of primary leaflets(N°Leaf1)	The number of primary leaflets of the main leaf and arranged along the rachis or the number of secondary leaves consisting of secondary leaflets (tertiary leaf).
	7-Primary leaflet length (LLeaf1)	The length of the secondary rachis of the primary leaflet or length of secondary leaf
	8-Width of the primary leaflets (WLeaf1)	The width of the primary leaflet or secondary leaf
	9-Length of the internodes (LIN)	The length connecting two nodes or the length of two points of successive insertions of organs or leaf scars, from the base to the apex of the seedling

Data analysis

The statistical analyses were first performed using one-dimensional descriptive statistics, link analysis (linear regression, correlation, and covariance) and multidimensional analysis (principal component analysis PCA) with XLSTAT 2020 version 7.5. The difference between the germination and morphology parameters was assessed using a two-factor multivariate analysis (MANOVA) with SAS software version 9.4. The Student-Newman-Keuls test at the 5% threshold was used for post-hoc comparisons.

IV. RESULTS

Description of the germination process for *Parkia biglobosa* seeds

The germination of *Parkia biglobosa* is hypogeal generally with a thick epicotyl at the base reaching an average of 2.07 mm in diameter at the collar and an average of 8.3 cm in length about 22 days after sowing. The pre-leaves are composed and bipinnate with generally 4 primary leaflets who composed an average of 11 pairs of secondary leaflets. The leaves following the pre-leaves are generally composed of two primary leaflets. Subsequently, the seedling produces bipinnate compound leaves with

more and more primary leaflets (up to 10 primary leaflets with an average of 36 pairs of secondary leaflets at three months of age). Phyllotaxis is alternating spiro-disc at this stage and each leaf carries two stipules, one of which has the leaf sheath and another at the end of the leaf (at the point of insertion of the last two primary leaflets, at the end of the rachis).

Germination and development parameters at each study site

Germination parameters

Environment 1: Korhogo nursery

At the Korhogo nursery, the first germinations started on the 7th day and the 9th day with seeds from mother trees number 4 and 1 respectively. The shortest time to germination were obtained from seeds of mother tree number 1, with a variation of 9 to 24 days around an average of 18.04 ± 4.18 days. As for the best germination speed, it was 18 days and was obtained from mother tree number 1 as well. Short germination spread times were observed in mother trees number 1, 3 and 4 in 15, 18 and 18 days respectively. Finally, the good germination rates were 90% and 93.33% respectively in the seeds of mother trees 1 and 3.

Environment 2: Daloa nursery

In Daloa nursery, the smallest germination latency was 4 days and was observed in seeds of mother tree number 4. The smallest germination delays were observed in seeds of mother trees number 1, 3 and 4 with respective variations from 10 to 21 days around an average of 16.13 ± 2.78 days, from 13 to 30 days with an average of 17.98 ± 4.01 days and from 4 to 27 days around an average of 16.64 ± 5.68 days. The fastest germination speeds were 15, 16 and 18 days, respectively observed in seeds of mother trees number 1, 4 and 3. The smallest germination duration was 11 days and observed in seeds of the mother tree number 1. As for the best germination rates, they were observed in the seeds of mother trees number 1, 2, 3, 4 and 6 with respectively rates of 100%, 95.50%, 100%, 92, 50% and 100%.

Environment 3: Montpellier greenhouse

In Montpellier greenhouse, the smallest germination latency times were 9 and 14 days and were observed in seeds of mother trees number 6 and 3 respectively. The shortest time to germination was observed in seeds of mother tree number 5 with a variation of 21 to 46 days around an average of 29.43 ± 11.81 days. The seeds of mother tree number 6 obtained a very good germination speed (17 days) unlike the others. The seeds of mother tree number 5 had short germination times (25 days) compared to the others. As for the germination rates,

they were higher than in the seeds of mother trees number 1, 5 and 6 (respectively 80%, 70% and 70%).

Development parameters

Environment 1: Korhogo nursery

At the Korhogo nursery, the greatest sowing heights were obtained from seedlings resulting from the germination of seeds of mother tree number 3 (20.4 ± 2.61 cm). Large mean diameters were observed in seedlings grown from seed germination of mother tree 3 (2.61 ± 0.12 mm) and 4 (2.51 ± 0.43 mm). The number of leaves was higher in seedlings resulting from seed germination of mother tree number 6 (4.02 ± 0.42). As for the length of the leaves, it was greater in seedlings from mother tree 1 (11.11 ± 0.59 cm) and 6 (10.11 ± 1.34 cm). Leaf width was greatest in seedlings originating from seed germination of mother tree number 1 (10.2 ± 0.23 cm). The number of primary leaflets was higher in seedlings from mother trees 5 (5.63 ± 0.34) 3 (5.21 ± 0.26). Primary leaflet length was greater in seedlings originating from seed germination of mother trees 3 (7.51 ± 0.14 cm) and 6 (7.46 ± 0.21 cm). The largest primary leaflet widths were observed in seedlings from mother trees number 4 (4.21 ± 0.34 cm) and 3 (3.81 ± 0.21 cm). Finally, the longest internodes were observed in seedlings from the seeds of mother tree 1 (3.57 ± 0.2 cm).

Environment 2: Daloa nursery

In Daloa nursery, the greatest sowing heights were observed in seedlings resulting from the germination of seeds from mother tree number 5 (28.1 ± 2.27 cm). The largest diameters were observed in seedlings resulting from the germination of seeds of mother tree 6 (4.42 ± 0.29 mm). Leaf numbers were highest in seedlings of seeds from mother trees number 6 (4.89 ± 0.28), 1 (4.75 ± 0.45), 3 (4.56 ± 0.21), 5 (4.46 ± 0.51) and 2 (4.32 ± 0.51). The longest leaf lengths were observed in seedlings of mother trees 5 (13.52 ± 1.08 cm), 6 (12.24 ± 1.54 cm) and 1 (12.2 ± 0.31 cm). The greatest widths were observed in seedlings of the seeds of mother trees 5 (13 ± 0.54 cm) and 6 (12.31 ± 0.34 cm). Primary leaflet numbers were highest in seedlings of mother trees 5 (5.58 ± 0.37), 1 (5.2 ± 0.22), 6 (5.03 ± 0.52) and 3 (5 ± 0.46). The longest primary leaflets were observed in seedlings of mother trees 6 (9.76 ± 0.64 cm), 4 (9.65 ± 0.36 cm), 3 (8.56 ± 0.37 cm) and 1 (8.21 ± 0.36 cm). Primary leaflet widths were greater in seedlings from mother trees 6 (4.26 ± 0.33 cm), 2 (4.23 ± 0.22 cm) and 3 (4.21 ± 0.54 cm). As for internode lengths, they were greater in seedlings resulting from the germination of seeds from mother trees 5 (3, 47 ± 0.54 cm), 2 (3.42 ± 0.36 cm) and 4 (3.28 ± 0.37 cm) and.

Environment 3: Montpellier greenhouse

In the Montpellier greenhouse, the greatest heights of the seedlings were observed in the seedlings resulting from the germination of the seeds of the mother trees 4 (28.2 ± 2.11 cm), 6 (27.62 ± 2.66 cm), 2 (27.4 ± 2.05 cm). The high diameters were observed in seedlings of mother trees 1 (3.71 ± 0.27 mm), 3 (3.67 ± 0.41 mm), 5 (3.57 ± 0.25 mm) and 6 (3.31 ± 0.20 mm). Leaf numbers were highest in seedlings of mother tree 1 (5.6 ± 0.17). The longest leaf lengths were observed in seedlings grown from seed germination of mother tree 2 (14.23 ± 1.35 cm). The largest leaf widths were observed in seedlings from mother trees 1 (12.31 ± 0.54 cm), 2 (13.96 ± 0.52 cm) and 6 (12.08 ± 0.44 cm). Primary leaflet numbers were highest in seedlings of mother trees 3 (5.64 ± 0.51), 4 (5.26 ± 0.54) and 6 (5.28 ± 0.22). The long primary leaflet lengths were observed in seedlings of mother trees 2 (10.56 ± 0.47 cm)

and 6 (11.28 ± 0.24 cm). The large widths of the primary leaflets were observed in seedlings of mother trees 5 (4.59 ± 0.16 cm) and 6 (4.67 ± 0.43 cm). finally, internode lengths were greater in seedlings of mother trees 3 (3.97 ± 0.30 cm) and 5 (3.9 ± 0.44 cm).

Global trend of assessed parameters

Germination parameters

Figure 2 gives a global overview of all germination parameters observed at the three study sites and indicates that the germination was best in Daloa and Montpellier environments. The highest values for germination waiting time, germination delay, germination speed and germination duration were recorded in Korhogo environment. The Montpellier greenhouse ranked second for all germination variables observed (fig. 2).

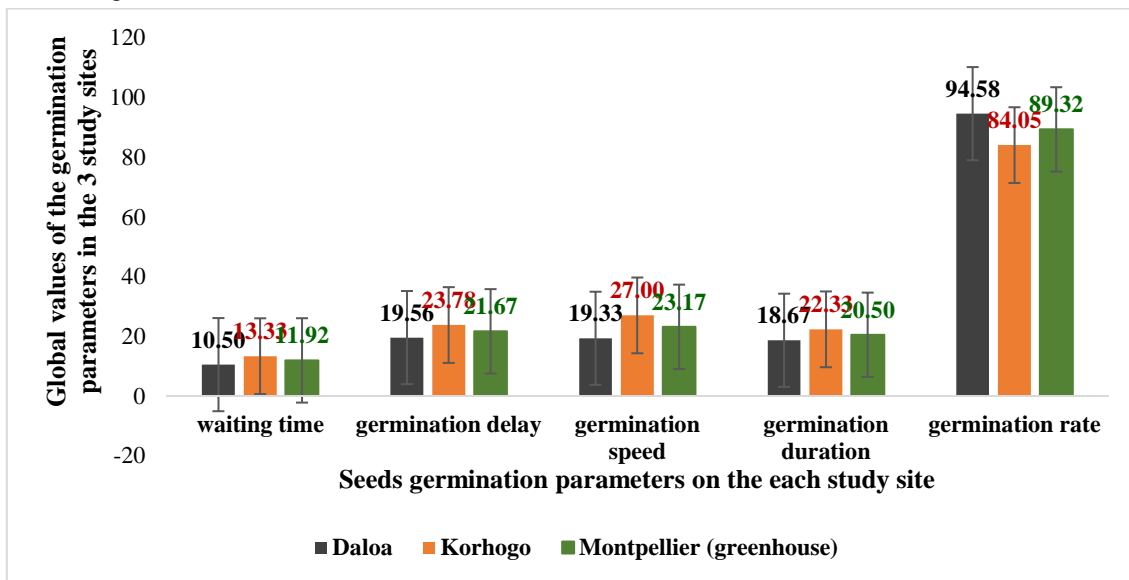


Fig. 2 Comparison of each germination parameter at the 3 study sites.

Influence of environment and mother trees on seeds germination

The comparison of seeds germination compared to the experimental sites, revealed a significant variability between the three study sites for all the germination

parameters evaluated ($P < 0.05$) (Table 4). The variance analysis of germination parameters (Table 4) shows, however, that all the germination variables observed overall are statistically identical from one mother tree to another ($p > 0.05$) on the three experimental sites.

Table 4 Comparison of germination parameters assessed according to the environment and mother trees used
For each character, values with the same letters are not statistically different at the 5% threshold.

Environments/ Mother trees	waiting time	germinationdelay	germination speed	germination duration	germination rate
Korhogo nursery	17.83 ± 2.12	34.69 ± 1.32 a	39.83 ± 7.19 a	38 ± 3.58 a	64.44 ± 4.44 b
Daloa nursery	10.50 ± 1.38	19.56 ± 1.34 c	19.33 ± 1.74 b	18.66 ± 2.33 b	94.58 ± 3.62 a

Montpellier greenhouse	13.33 ± 1.84 ab	23.77 ± 1.36 b	27 ± 2.47 ab	22.33 ± 2.14 b	84.05 ± 3.83 a
Pr > F	0.036	0.001	0.018	0.001	0.001
Mother tree-1	13.33 ± 3.84 a	24.07 ± 7.01 a	21.66 ± 5.24 a	23 ± 10.07 a	90 ± 5.77 a
Mother tree-2	17 ± 2.08 a	27.63 ± 4.06 a	32.66 ± 8.97 a	25.33 ± 4.48 a	78.05 ± 14.37 a
Mother tree-3	14.66 ± 1.20 a	25.92 ± 5.20 a	32 ± 11.13 a	28.33 ± 10.83 a	84.44 ± 12.37 a
Mother tree-4	11 ± 5.57 a	25.32 ± 6.26 a	34 ± 13.74 a	31 ± 5.68 a	78.39 ± 11.02 a
Mother tree-5	15 ± 3.05 a	26.55 ± 1.45 a	29 ± 3.05 a	24.66 ± 1.45 a	71.39 ± 3.20 a
Mother tree-6	12.33 ± 2.02 a	26.56 ± 3.37 a	23 ± 4.58 a	25.67 ± 5.61 a	83.88 ± 8.73 a
Pr > F	0.828	0.996	0.864	0.972	0.828

Development parameters

Influence of environment and mother trees on seedlings development

The comparison of experimental sites compared to the seedling morphology (Table 5) revealed that there is a significant difference between the study sites for the variable's height, diameter, number of leaves, length of

leaves, length of primary leaflets and internode length ($P < 0.05$). Unlike leaf width, number of primary leaflets and width of primary leaflets which were statistically identical regardless of the study site ($p > 0.05$). The results of variance analysis (Table 5) of seedlings morphology in relation to their origin (mother tree) showed that the set of development parameters evaluated were identical in the whole of a mother tree to another ($p > 0.05$).

Table 5 Comparison of morphological parameters assessed according to the environment and mother trees used

For each character, values with the same letters are not statistically different at the 5% threshold.

Environments/ Mother trees	SH (cm)	Dcol (mm)	N°L	LL (cm)	LW (cm)	N°Leaf l	LLeafl (cm)	WLeaf l (cm)	LIN (cm)
Korhogo nursery	19.51±0. 74 b	2.21±0. 15 b	3.52±0. 12 b	9.37±0. 49 b	9.01±0. 47 a	4.65±0. 34 a	6.69±0. 31 b	3.12±0. 32 a	2.45±0.2 b
Daloa nursery	25.52±0. 83 a	3.12±0. 34 a	4.38±0. 23 a	11.57± 0.57 a	10.86± 0.67 a	4.96±0. 18 a	8.46±0. 44 a	3.82±0. 19 a	2.98±0.2 ab
Montpellier greenhouse	26.35±0. 85 a	3.29±0. 19 a	4.65±0. 22 a	12.73± 0.53 a	11.22± 0.83 a	5.02±0. 19 a	9.49±0. 55 a	3.81±0. 28 a	3.54±0.1 9 a
Pr > F	0.001	0.015	0.003	0.002	0.076	0.545	0.002	0.138	0.016
Mother tree-1	23.27±2. 84 a	2.74±0. 49 a	4.53±0. 69 a	12.28± 0.70 a	11.25± 0.61 a	4.88±0. 22 a	7.43±0. 49 a	3.35±0. 15 a	2.84±0.3 9 a
Mother tree-2	23.41±2. 27 a	2.45±0. 34 a	3.94±0. 34 a	11.05± 1.59 a	10.78± 1.61 a	4.59±0. 02 a	8.27±1. 15 a	3.47±0. 39 a	3.15±0.3 1 a
Mother tree-3	23.03±1. 74 a	2.89±0. 39 a	4.23±0. 36 a	10.56± 1.14 a	9.37±1. 05 a	5.28±0. 18 a	8.54±0. 58 a	3.67±0. 36 a	2.90±0.6 0 a
Mother tree-4	22.89±3. 05 a	2.93±0. 46 a	3.76±0. 38 a	9.83±1. 13 a	9.08±0. 87 a	5.07±0. 38 a	8.46±1. 12 a	3.81±0. 2 a	2.87±0.5 1 a
Mother tree-5	25.53±1. 67 a	2.94±0. 63 a	4.31±0. 37 a	12.13± 1.33 a	10.37± 1.35 a	4.93±0. 37 a	7.10±0. 85 a	3.51±0. 63 a	3.45±0.2 6 a

Mother tree-6	26.61±2. 56 a	3.31±0. 52 a	4.31±0. 29 a	11.50± 0.69 a	11.33± 0.86 a	4.52±0. 64 a	9.50±1. 11 a	3.70±0. 77 a	2.74±0.5 4 a
Pr> F	0.961	0.879	0.812	0.651	0.611	0.674	0.537	0.983	0.883

SH: seedling height; **Dcol:** Diameter of the seedlings; **N°L:** Number of main leaves; **LL:** Main leaf length; **LW:** Main leaf Width; **N°Leafl:** Number of primary leaflets; **LLeafl:** Primary leaflet length; **WLeafl:** Width of the primary leaflets; **LIN:** Length of the internodes; **cm:** centimetres; **mm:** millimetres.

Figure 3 shows the projection of study site and morphological parameters of all the seedlings on the PCA 1-2 (biplot). The analysis of the matrix of factor weights allowed the extraction of two components that explain 100% of the variability and therefore the total variation between the morphological characteristics of the seedlings and the environments. Plan 1-2 is characterized by

eigenvalues of 97.57% for axis F1 and 2.43% for axis F2. The different descriptors contributing to the formation of the first (F1) and second component (F2) form a single group consisting of the Daloa and Montpellier (greenhouse) sites characterized by all morphological parameters higher than those of the seedlings in Korhogo site.

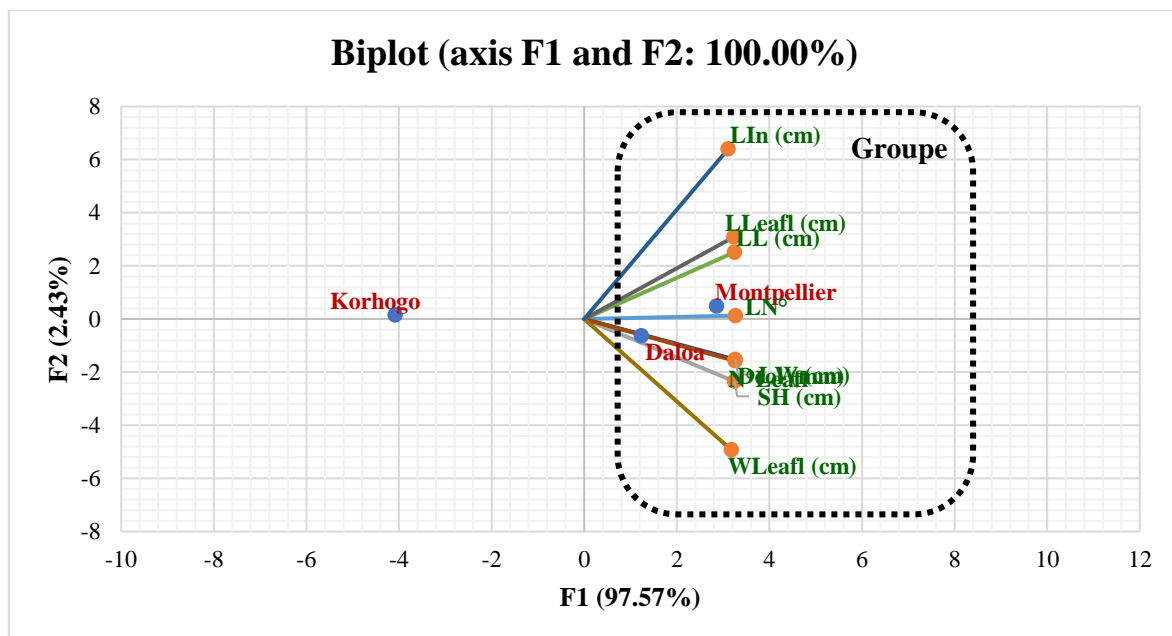


Fig. 3 Projection of study sites and morphological parameters observed in PCA Plan 1-2 as a function of the type of axis

V. DISCUSSION

Germination and seedling morphology parameters

The germination of *Parkia biglobosa* was found to be hypogeal, in agreement with Douma et al. (2019) and Millogo (2014). Seeds were peeled then soaked in water to break dormancy. Previous studies reported that integumentary inhibition or pericarpic and embryonic dormancy are major causes of low germination rates (Diatta et al. 2009). These integument inhibitory effects have been observed in many species including *Pterocarpus santalinus* (Rajendrudu and Naidu 2001), *Maeruacrassifolia* (Diatta et al. 2009), *Faidherbiaalbida* (Ameri et al. 2017), *Pterocarpus erinaceus* (N'golo et al. 2018) and *Parkia biglobosa* (Douma et al. 2019).

Seeds and seedlings from seed germination of mother trees number 1, 3 and 6 performed best regardless of the study site; probably because of the size of the seeds collected on and under these mother trees. These three mother trees have the greatest dendrometrics characteristics among all the mother trees selected for this study. These mother trees could be identified as very good parents for the production of vigorous, resistant genotypes and elite trees for the establishment of permanent plots within the framework of the execution of a reforestation or agroforestry program. This study shows that large trees with large diameters produce large seeds which in turn generate vigorous seedlings. This observation could be studied on a large number of mother trees in order to consolidate the results and popularize them in a paying

environment for a domestication and a large-scale sustainable management of this species. Several studies have shown that seed size plays a large role in successful germination and the production of vigorous seedlings that are resilient to climatic stress (Gunaga et al. 2007; Gunaga and Vasudeva 2011; Mao et al. 2019 etc.).

Overall, the germination parameters were as good as our expectation and imagination. Despite the non-treatment of the seeds with sulfuric acid (H₂SO₄), nor the scarification of the seeds or hot water for the lifting of dormancy, we obtained rates of up to 100% in natural areas as foreign to this species. In Niger, Douma et al. (2019) treated *Parkia biglobosa* seeds with sulfuric acid (H₂SO₄), which resulted in a two-day lag time, a four-day germination rate, and a germination rate of 80-92%. With the scarified seeds of *Parkia biglobosa*, the same authors obtained a latency time of three days, a germination rate of four days and a germination of 100%. When they heated the seeds, the germination rate was only 16-24%. Yet without nursery treatment, Amonum et al. (2016) obtained a latency time of six days, a germination rate of 33 days, the total germination time was 31 days, and the seed germination rate was 58.86%. Similarly, in a study on the viability of *Parkia biglobosa* seeds in Burkina Faso, Millogo (2014) obtained with seed banks a low germination rate (0.83-14.67%). According to him, this was due to a remarkably high loss of genetic diversity. The results of this study on seedling morphology are comparable to those obtained in Niger by Douma et al. (2019) but in disagreement with the studies by Gnanglè et al. (2010) in Benin. These last authors obtained with five (5) growth accelerators on plants of *Parkia biglobosa* in 140 days an average height of 26.3 cm, an average diameter of 6.6 mm with an average of 8.5 leaves. We had thought that *Parkia biglobosa* seeds would not grow in an environment other than its natural range. However, the seeds germinated there (Daloa nursery and Montpellier greenhouse) more efficiently with more vigorous seedlings than those in its area of origin (Korhogo). This is undoubtedly the cause of more lenient environments (fertile soil, higher air humidity, favorable temperature, etc.) than in its natural zone (low humidity, high temperature, poor soil). This species shows its ability to adapt to different foreign environments through this study. For guaranteed conservation (domestication), this species could be introduced into permanent agroforestry systems throughout the territory of Côte d'Ivoire. In addition, it is a species that restores soil fertility (leguminous plant). It could therefore be a replacement solution for the chemical fertilizers used permanently in the fallow areas of the savannah (natural environment for the species) and forest areas (environment foreign to the species) of the country.

The analysis of variance showed that the mother trees do not significantly influence each parameter of germination and seedling morphology for all three sites ($P > 0.05$). Indeed, this is normal since it is the seeds and seedlings of the same mother trees that were evaluated on all three sites. But, taken in isolation site by site, the parameters of germination and seedling morphology differ from one mother tree to another for each site. We believe that the dendrometric characteristics of mother trees should be considered in seed collections for studies of germination and production of seedlings for species conservation (domestication). However, the comparison of the germination and development parameters of the seedlings according to each of the three experimental sites indicated that the three sites differ significantly for all the parameters evaluated ($P < 0.05$). In fact, each site is made up of its own distinct microclimatic characteristics (type of soil, availability of water in the soil and in the ambient air, temperatures, etc.). Korhogo is located in a savannah zone (poor, arid soil with high temperatures, dry tropical climate), Daloa is located in a forest zone (rich and humid soil, mild temperature, humid tropical climate) and the Montpellier greenhouse is stable with a potting soil is made up of a mixture of substrates rich in mineral elements. Several studies have shown the effect of climate or climatic zone, soil, mother trees and seed provenance on plant growth and development (Giordano 1972; Assogbadjo et al. 2006; Dianda et al. 2009; Sambe et al. 2010).

VI. CONCLUSION

This study showed that the dendrometric characteristics of mother trees could be a factor in the selection of vigorous seed and seedlings in the context of conservation (domestication) of *Parkia biglobosa*. The larger the mother trees are, the larger the seeds they produce, which in turn generate more vigorous seedlings. This study also showed that this species is adaptable to foreign environments. It grows better in a milder environment that is different from its native area. Overall, the mother trees did not statistically influence each germination and development parameter for all three sites combined. However, analysis of variance showed that germination and seedling development parameters differed from one experimental site to another. A rich soil and a stable or humid tropical climate (Montpellier greenhouse and Daloa site) guarantee good germination and seedling development in *Parkia biglobosa*. These results are useful and could be used as decision support tools to guide conservation (domestication) and agroforestry programmes based on *Parkia biglobosa*. This study could be extended

to other endangered species in order to safeguard humanity.

VII. AUTHOR'S CONTRIBUTION

Beda Innocent Adji: Conception, methodology, supervision, software, formal analysis, writing the paper, resources, data acquisition and analysis. **Sélastique Doffou Akaffou:** Project administration, methodology, resources, data acquisition, supervision, writing the paper - original project, research and acquisition of funding. **Sylvie Sabatier:** Project administration, methodology, resources, data acquisition, supervision, writing the paper - original project, research and acquisition of funding.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was financed by the Ministry of Higher Education and Scientific Research of Côte d'Ivoire, the French Development Agency and IRD (*Institut de Recherche pour le Développement*) within the framework of PRESeD-CI 2 (Renewed Partnership for Research for Development in Côte d'Ivoire) and C2D (Debt Reduction Contract) of the AMRUGE-CI project (Support for the Modernization and Reform of Universities and *Grandes Ecoles* of Côte d'Ivoire). We would like to thank the CNRA (*Centre National de Recherche Agronomique*) of Côte d'Ivoire for allowing access to its scientific research site and for supplying the plant material (*Pterocarpus erinaceus* Poir., 1804) used for this study. The authors are grateful to the *Centre de Coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement* (CIRAD) for providing a greenhouse (controlled environment) and the technical equipment necessary to conduct the study.

DATA AVAILABILITY

The datasets generated during and/or analysed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that there is no conflict of interest either between the authors, or between the organisations which financed the work, or on the site used for the experiments. All the authors agree to the publication of the submitted version of the paper.

REFERENCES

[1] Akaffou SD, Kouamé KA, Gore BBN, Abessika YG, Kouassi KH, Hamon P, Sabatier S, Duminil J (2019) Effect

of the seeds provenance and treatment on the germination rate and plants growth of four forest trees species of Côte d'Ivoire. *J. For. Res.* 10 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01064-y>

- [2] Ake AL (1999) Effets de l'exploitation forestière sur la conservation de la diversité biologique en Afrique de l'Ouest: le cas de la Côte d'Ivoire. In: Ouédraogo AS & Boffa JM (eds) Vers une approche régionale des ressources génétiques en Afrique Sub-Saharienne. Actes du premier atelier régional de formation sur la conservation et l'utilisation durable des Ressources Génétiques Forestières en Afrique de l'Ouest. Afrique Centrale et Madagascar. Mars 1998. Ouagadougou. CNSF/IPGRI. pp 101-106.
- [3] Amani MM, Inoussa I, Dan G, Mahamane A, Saadou M, Lykke AM (2015) Germination et croissance de quatre espèces de Combretaceae en pépinière. *Tropicultura* 33 (2): 123-145
- [4] Ameri AH, Daldoum AMD (2017) Effect of different pretreatment methods and materials on germination potential of *Faidherbia albida* seeds. *Scholars Journal of Agriculture and Veterinary Sciences* 4 (3): 86-90.
- [5] Amonum JL, Nyam RT, Gbande S (2016) Effect of pre-treatments on seed germination of *Parkia biglobosa* (Benth). *Journal of Research in Forestry, Wildlife and Environment* 8 (4): 364-369.
- [6] Assogbadjo AE, Kyndt T, Sinsin B, Gheysen G, Van DP (2006) Patterns of genetic and morphometric diversity in baobab (*Adansonia digitata* L.) populations across different climatic zones of Benin (West Africa). *Annals of Botany.* 97: 819-830.
- [7] Avana-tientcheu MLA, Keouna S, Dongock ND, Mouga MB (2019) Structure des peuplements et potentiel de domestication de *Parkia biglobosa* dans la région de Tandjilé-Ouest (Tchad). *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 13(1): p 219-236.
- [8] Azokpota P, Hounhouigan DJ, Nago MC (2006) Microbiological and chemical changes during the fermentation of African locust bean (*Parkia biglobosa*) to produce afitin, iru and sonru, three traditional condiments produced in Benin. *International Journal of Food Microbiology.* 107: 304-309. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2005.10.026>
- [9] Berka S, Abdelkader H (2001) Effets de quelques traitements physico-chimiques et de la température sur la faculté germinative de la graine d'Arganier. *Revue Forestière Française.* 53 (2) :125-130.
- [10] Chupezi TJ, Ndoye O, Tchata M, Chikamai B (2009) Processing and Marketing of Non-wood Forest Products: Potential Impacts and Challenges in Africa. *Discovery & Innovations*, 21 (SFM Special Edition No.1): 60-65.
- [11] Dianda M, Bayala J, Diop T, Ouédraogo SJ (2009) Improving growth of shea butter tree (*Vitellaria paradoxa* C.F.Gaertn.) seedlings using mineral N, P and arbuscular mycorrhizal (AM) fungi. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 13(1): 93-102.
- [12] Diatta S, Salifou I, Sy MO, Kabore-Zoungrana CY, Banoin M, Akpo LE (2009) Évaluation des potentialités germinatives d'un ligneux fourrager sahélier: *Maerua*

- crassifolia* Forsk. Capparaceae. 1-11p. <http://www.irrd.org>. Accessed 17 June 2020
- [13] Douma S, Adamou MM, Aboubacar K, Alleidi I, Boubacar AN (2019) Effet du régime d'irrigation sur la germination et la croissance en pépinière de *Parkia biglobosa* (Jacq.) G. Don. *J. Anim.PlantSci.* 40 (1): 6573-6583.
- [14] Dumenu WK (2019) Assessing the impact of felling/export ban and CITES designation on exploitation of African rosewood (*Pterocarpus erinaceus*). *Biological Conservation.* 236: 124–133. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.05.044>
- [15] Eba'a AR, Lescuyer G, Gouhouo PJ, Moulende FT (2013) Etude de l'importance économique et sociale du secteur forestier et faunique dans les Etats d'Afrique Centrale: Cas du Cameroun. Rapport d'étude CIFOR. 316p.
- [16] Giordano E (1972) Interaction de la sélection et de la culture intensive. *Unasylva.* 97- 98: 82-88.
- [17] Nglanglè PCR, Glele k, Oumorou MNK, Bonou W, Sokpon N (2010) Tests de croissance de jeunes plants de néré (*Parkia biglobosa*. Jack. R. Br.) en pépinière. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 4(6): 1939-1952
- [18] Gorgon IT, Olga DY, Komla EA, Francois W, Kouami K (2015) Essai de germination et de croissance au stade juvénile des souches locales de *Jatropha curcas* en république centre africaine. *European Scientific Journal* ; vol.11, No.15. 260-276.
- [19] Gunaga R, Vasudeva R (2011) Influence of seed size on germination and seedling growth in *Mammea suriga*. *Karnataka Journal of Agricultural Sciences.* 24 (3) : (415 - 416).
- [20] Gunaga RP, Hareesh TS, Vasudeva R (2007) Effect of fruit size on early seedling vigour and Biomass in White Dammer (*Vateria indica*) : a vulnerable and economically important tree species of the Western Ghats. *Journal of Non-Timber Forest Products,* 14 : 197-200.
- [21] Héroult B, N'guessan AK, Ouatarra N, Ahoba A, Bénédet F, Coulibaly B, Doua-bi Y, Koffi T, Koffi-Konan JC, Konaté I, Tieoulé F, Wourro F, Zo-Bi IC, Louppe D (2020) The long-term performance of 35 tree species of sudanian West Africa in pure and mixed plantings. *Forest Ecology and Management* 468 (2020) 118171. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118171>
- [22] Houndonougbo JSH, Kassa B, Mensah S, Salako VK, Glèlè-Kakaï R, Assogbadjo AE (2020) A global systematic review on conservation and domestication of *Parkia biglobosa* (Jacq.) R. Br. ex G. Don, an indigenous fruit tree species in Sub-Saharan African traditional parklands: current knowledge and future directions. *Genet ResourCrop Evol* (2020) 67:1051–1066. <https://doi.org/10.1007/s10722-020-00892-w>
- [23] Koura K, Mbaide Y, Ganglo JC (2013) Caractéristiques phénotypique et structurale de la population de *Parkia biglobosa* (Jacq.) du Nord-Bénin. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 7(6): 2409-2425. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v7i6.19>
- [24] Maazou R, Rabiou H, Issiaka Y, Abdou L, Saidou IS, Mahamane A (2017) Influence de l'occupation des terres sur la dynamique des communautés végétales en zone Sahélienne: cas de la commune rurale de Dantchandou (Niger). *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 11(1): 79-92. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v11i1.7>
- [25] Maisharou A, Larwanou M (2015) Market Potential of Non-Wood Forest Products in The Sahelian Countries. *International Journal of Forestry Review.* 17(S3): 125-136.
- [26] Mao P, Guo L, Gao Y, Qi L, Cao B (2019) Effects of Seed Size and Sand Burial on Germination and Early Growth of Seedlings for Coastal *Pinus thunbergii* Parl. in the Northern Shandong Peninsula, China. *Forests* 10-281. <http://dx.doi.org/10.3390/f10030281>
- [27] Mapongmetsem PM, Nkongmeneck BA, Rongoumi G, Dongock DN, Dongmo B (2011) Impact des systèmes d'utilisation des terres sur la conservation de *Vitellariaparadoxa* Gaerten. F. (Sapotaceae) dans la région des savanes soudano-guinéennes. *International Journal of Environmental Studies.* 68 (6): 851-872. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207233.2011.587259>
- [28] Maréchal C, Cawoy V, Coquyt C, Dauby G, Dessein S, Douglas-Hamilton I, Dupain J, Fischer E, Obang DF, Groom Q, Henshel P, Jeffery KJ, Korte L, Lewis SL, Lubunu S, Maisels F, Melletti M, Ngouffo R, Ntore S, Palla F, Scholte P, Sonke B, Stevart T, Stoffelen P, Van Den Broeck D, Walters G, Williamson EA (2014) Conservation et Gestion de la biodiversité. In *Etat des Forets 2013*, De Wasseige C, Flynn J, Louppe D, Hiol-Hiol F, Mayaux Ph (eds). WeyRich: Belgique ; 67-96.
- [29] Millan M (2016) Analyse de la variabilité des traits architecturaux des formes de croissance dans les Communautés végétales. Thèse de botanique. Université de Montpellier. Français. 178 p. Id: tel-02489116. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02489116>. Accessed 26 June 2019
- [30] Millogo AMD (2014) Etudes des caractéristiques morphologiques et de la viabilité des semences de *Parkia biglobosa* (jacq.) r. br.ex g. don. - germoplasme de conservation à long terme a 4° C. Mémoire de Master (Burkina Faso): Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso. 61 pages. <http://www.secheresse.info/spip.php?article96609>. Accessed 3 October 2019
- [31] N'golo B, Noufou DO, Djézou K, Adama B, Fezan HT (2018) Effets de cinq prétraitements sur la germination du vène (*Pterocarpus erinaceus* Poir., Fabaceae) dans la Réserve du Haut Bandama (Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal* October 2018 edition Vol.14, No.30 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431
- [32] Rajendrudu G, Naidu CV (2001) Influence of kinetin and nitrogenous salts on seed germination of red sanders (*Pterocarpus santalinus* Linn. f.). *Seed Science and Technology.* 29 (3) : 669-672.
- [33] Sambe MAN, Sagna M, Sy MO (2010). Seed germination and in vitro plant regeneration of *Parkia biglobosa* (Jacq.) Benth. *African Journal of Biotechnology.* 9(21): 3099-3108.
- [34] Sas II (2009) SAS Online Doc® 9.4. Cary. NC: SAS Institute Inc.

- [35] Segla NK, Rabiou H, Adjonou K, Moussa BM, Saley K, Radji RA, Kokutse AD, Bationo AB, Mahamane A, Kokou K (2016) Population structure and minimum felling diameter of *Pterocarpus erinaceus* Poir in arid and semi-arid climate zones of West Africa. South African Journal of Botany. 103: 17–24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sajb.2015.09.005>
- [36] Sina S (2006). Reproduction et Diversité Génétique chez *Parkia biglobosa* (Jacq.) G.Don. (PhD thesis Wageningen University. Wageningen. The Netherlands). 102 p. <http://edepot.wur.nl/121771>. Accessed 24 November 2019
- [37] Zerbo P, Belem B, Mllogo-Rasolodimby J, Van DP (2010) Germination sexuée et croissance précoce d'*Ozoroainsignissp* Del. Une espèce médicinale du Burkina Faso. Cameroon Journal of Experimental Biology. Vol. 06 N°02. 74-80.

PUBLICATION 6

Beda Innocent Adji, Dofou Sélastique Akaffou, Philippe De Reffye and Sylvie Sabatier.

2021.

MATERNAL ENVIRONMENT AND SEED SIZE ARE IMPORTANT FOR SUCCESSFUL GERMINATION AND SEEDLING ESTABLISHMENT OF *PTEROCARPUS ERINACEUS* (FABACEAE). *Journal of Forestry Research*, 33, 977-990. <https://doi.org/10.1007/s11676-021-01412-x>



Maternal environment and seed size are important for successful germination and seedling establishment of *Pterocarpus erinaceus* (Fabaceae)

Beda Innocent Adji^{1,2} · Doffou Sélastique Akaffou¹ · Philippe De Reffye² · Sylvie Sabatier²

Received: 2 December 2020 / Accepted: 21 June 2021
© Northeast Forestry University 2021

Abstract Seed size and the growth environment are important variables that influence seed germination, growth and biomass of seedlings and future tree harvest and should thus be taken into account in agroforestry and reforestation programmes for endangered species like *Pterocarpus erinaceus*. In the present study, to assess seedling germination and vigour in *P. erinaceus* as a function of seed size in two environments, 1080 seeds and 360 seedlings were evaluated at two separate sites in Côte d'Ivoire. The results show that large seeds had very high germination rates (up to 100%) and produced more vigorous plants better able to adapt to climate change. The maternal environment and seed size had a significant influence on seed germination ($P < 0.05$) and seedling development ($P < 0.05$) and biomass ($P < 0.05$). Seedlings were most successful at the site with

a humid tropical climate (Daloa). Seedling leaves had the same resistance regardless of seed size and study site, but leaf moisture content was more stable in seedlings grown from medium and small seeds. These results will help guide conservation strategies for the species and are key factors for rural populations, loggers, and forest management structures for the silviculture of this species.

Keywords *Pterocarpus erinaceus* · Seed size · Germination performance · Seedling · Growth

Introduction

The vulnerability of forests to drought and continued anthropogenic pressures are major concerns worldwide (Choat et al. 2012; Mbowa et al. 2013; Segla et al. 2016; Héralut et al. 2020; Amani et al., 2015). In Africa, many species are overexploited and threatened with extinction because of their multiple uses (Ake, 1999; Houndonoubo et al. 2020; Adji et al., 2020). In particular, African rosewood (*Pterocarpus erinaceus* Poir.), native to arid and semi-arid areas of West Africa, is overexploited due to its highly valued wood for furniture and musical instruments, its sap for indigo dye, its amino-acid-rich leaves for livestock feed, and its leaves, bark, and roots are used to treat malaria and rheumatism and conditions such as fever, stomach aches, dental decay, general fatigue, and high blood pressure (Kossi et al. 2015; Rabiou et al. 2015; CoP17-Prop. xx 2016; CITES-Secrétariat, 2016; Dumenu 2019; Segla et al. 2016, 2020). Its exploitation is banned in many West African countries (in Côte d'Ivoire by decree n° 2013–508; MINEF 2013) because it has almost disappeared in its native range.

In the current context of climate change, rapid and effective reforestation and agroforestry strategies are needed to

Project funding: This study was financed by the Ministry of Higher Education and Scientific Research of Côte d'Ivoire, the French Development Agency and IRD (Institut de Recherche pour le Développement) in the framework of PRESeD-CI 2 (Renewed Partnership for Research for Development in Côte d'Ivoire) and C2D (Debt Reduction Contract) of the AMRUGE-CI project (Support for the Modernization and Reform of Universities and Grandes Ecoles of Côte d'Ivoire).

The online version is available at <http://www.springerlink.com>.

Corresponding editor: Yanbo Hu.

✉ Beda Innocent Adji
adjibedainnocent@gmail.com; beda-innocent.adji@cirad.fr

¹ Department for Seeds and Seedlings Production, Université Jean Lorougnon Guédé, Agroforestry UFR, BP 150, Daloa, Côte d'Ivoire

² UMR-botAnique Et Modélisation de L'Architecture Des Plantes Et Des Végétations (AMAP), CIRAD, Université Montpellier, CNRS, INRAE, 34398 Montpellier, IRD, France

sustainably manage and conserve the remaining populations of this species. For conservation, an effective method is domestication using regeneration techniques that require the study of germination to determine the best conditions for germination and subsequent growth and selection of vigorous, resilient plants to establish permanent plots of plants that can best adapt to global changes (Walsh and Lord 1996; Mao et al. 2019). For African rosewood, the fastest, most efficient techniques for optimizing its culture remains to be established.

Seed size is correlated with germination capacity and with several other plant characteristics, including dispersal pattern, growth form, biomass, specific leaf area (the main determinant of growth rate and an indicator of the quality of the species' maternal site), and future harvest (Westoby et al. 1996; Chacon et al. 1998; Gunaga and Vasudeva 2011). Sowing mixed seeds of the same species leads to varying vigour and seedling size. In general, larger seeds germinate faster and produce more vigorous stress-resistant seedlings than smaller seeds (Chacon et al. 1998; Gunaga and Vasudeva 2011). A possible explanation for this success is that large seeds contain more starch reserves and gibberellic acid, which stimulates germination by producing hydrolytic enzymes that weaken tissue barriers (i.e., the endosperm or seed coat) than small seeds, which contain less starch reserves and accumulate more abscisic acid, which stimulates the induction and maintenance of dormancy during embryonic growth (Finkelstein et al. 2008). In addition, in stressful environments, seedlings from large seeds develop roots that grow deeper and spread more widely than those from small seeds, which enable better survival and growth when resources are scarce (Gunaga and Vasudeva 2011).

Given the promising results of research on seed size in other species and the urgent need for rapid regeneration protocols to compensate for the drastic loss of *P. erinaceus* stands in Côte d'Ivoire and elsewhere, studying the germination and seedling growth in *P. erinaceus* in different environments should lead to strategies to ensure its conservation. Here we thus evaluated germination and seedling vigour in *P. erinaceus* as a function of seed size in two different

maternal environments to guide the choice of seed type to achieve vigorous seedlings for reforestation programmes and agroforestry systems in new environments that differ from its native zone.

Material and methods

Plant material

Two types of plant material were used. The first comprised 1080 shelled seeds of *P. erinaceus* collected from ripe fruits of seed trees in good physiological condition from four locations in Côte d'Ivoire (Table 1) in March 2020. The second type of material comprised 360 4-month-old seedlings resulting from the germination of the seeds of *P. erinaceus* we collected. These seedlings were reared in a nursery in two locations in Côte d'Ivoire. The dendrometric characteristics, the number of seed trees, and number of healthy seeds selected after hulling according to their provenance are listed in Table 1. The plant material belongs to the rural village communities whose plots we surveyed at each location; we received oral authorization to use the material. We vouchered a specimen of this material in the public herbarium (N° UCJ010935) at the National Centre for Floristics (*Centre National de Floristique*) in Côte d'Ivoire (Koffi et al. 2018) and at the Swiss Scientific Research Centre (*Centre Suisse de Recherche Scientifique*, CSRS) in Côte d'Ivoire (Bakayoko et al. 2020).

Methods

Experimental sites

The experiments ran from March to July 2020 in nurseries in two locations with different climate characteristics (Dalo and Korhogo) in Côte d'Ivoire (Fig. 1). The characteristics of the two study sites are listed in Table 2.

Table 1 Dendrometric characteristics and location of *Pterocarpus erinaceus* seed trees used

Provenance	GPS coordinates		No. of seed trees	DBH (cm)			Height (m)			No. of healthy seeds
	Longitude	Latitude		Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	
Katiola	5°7'35.814" W	8°13'53.94"N	4	12.6	32.1	22.2 ± 8.5 ^b	7.5	14	9.1 ± 4.51 ^a	124 ^b
Niakara	5°18'40.735" W	8°40'47.97"N	7	24.5	42.3	27.5 ± 3.5 ^a	9	23	13.3 ± 2.1 ^a	529 ^a
Korhogo	5°36'12.316" W	9°33'24.69"N	8	24.4	36.6	30.4 ± 2.1 ^a	12	19	14.7 ± 3.6 ^a	611 ^a
Ferké	5°23'43.396" W	9°36'1.87"N	3	22.1	24.6	22.6 ± 11.5 ^b	11.5	13	11.7 ± 6.4 ^a	82 ^b
<i>Pr > F</i>						0.0321			0.652	0.002

Min minimum, *Max* maximum. In the same column, values with identical letters are statistically identical, while values with different letters are significantly different at the 5% threshold

Fig. 1 Geographical location of the study sites

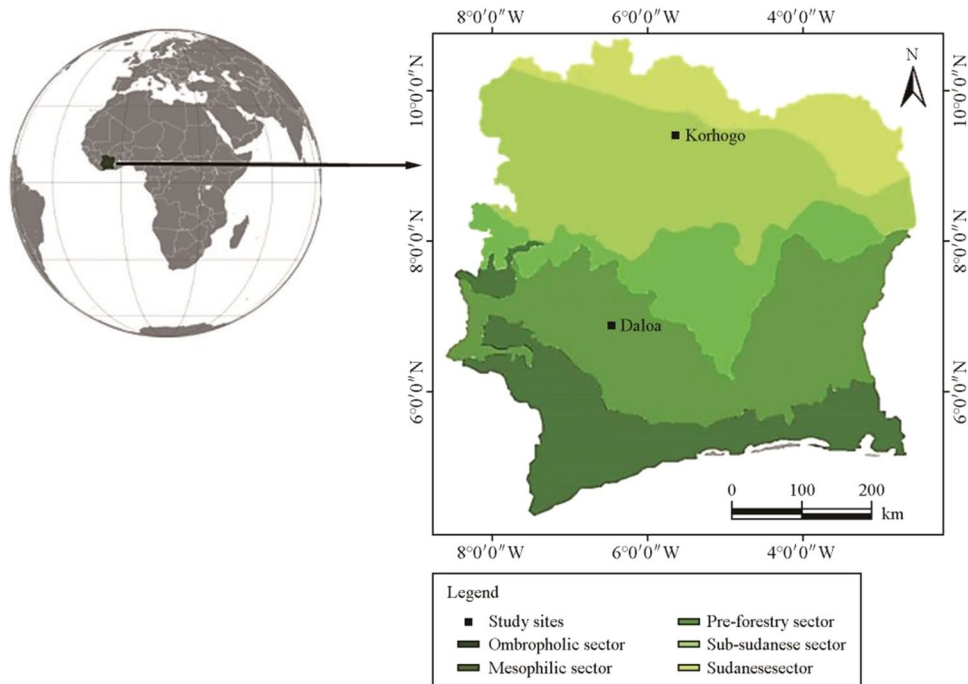


Table 2 Geographical location and characteristics of study sites (Guillaumet et al. 1971; Louppe and Ouattara 1996; Akaffou et al. 2021; Hérault et al. 2020)

Study sites	Coordinates	Vegetation	Climate	Temperature (°C)	Rainfall (mm/y)	RH (%)	Soil type
Korhogo	9°57'0\"/>						
Daloa	6°9'0\"/>						

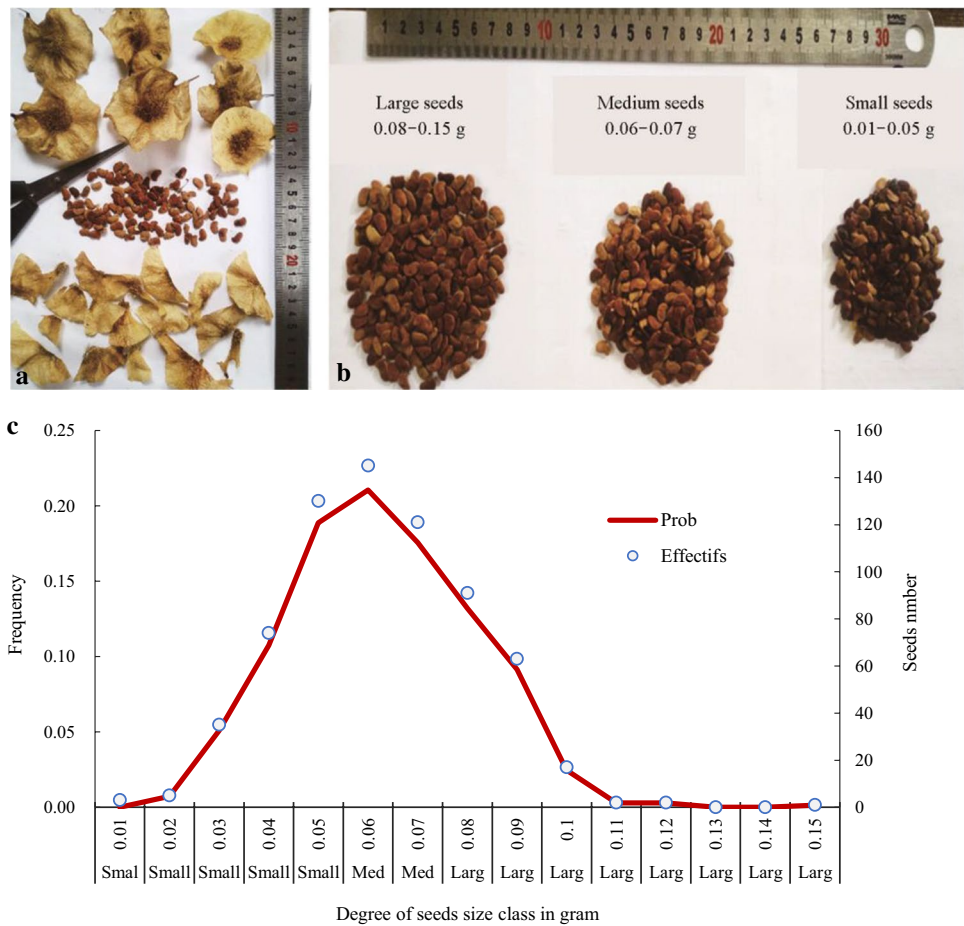
RH relative humidity

Collecting and sorting seeds

Ripe fruits were randomly collected from seed trees in good physiological condition in the four locations mentioned above. The thorny seed shell of each fruit was removed so

the seed could be extracted (Fig. 2a). All the seeds from the trees sampled at each origin were mixed in a large container so that their exact origin (mother tree) could not be distinguished. A random batch of 100 seeds was removed from the container to weigh each seed and measure length, width, and

Fig. 2 Husking (a), sorting seeds into large, medium, and small categories from left to right (b) and distribution of seeds number and frequency according their size (c)



thickness and calculate a seed shape index (ratio of width to length) (Millogo 2014).

Batches of 100 seeds were removed, weighed and measured until the container was empty for a total of 13.46 batches (124 seeds to Katiola + 529 seeds to Niakara + 611 seeds to Korhogo + 82 seeds to Ferké = 1346 seeds/100 seeds per batch = 13.46 batch).

The seeds were sorted into three size categories (large, medium and small) (Fig. 2b) based on the results of an

analysis of variance (ANOVA) of all the dimensions (mass, length, width and shape index) recorded (Table 3).

Setting up nursery trials

Black polyethylene bags (20 cm × 10 cm) with drainage holes were filled with local potting soil, then grouped to form three subblocks. In each nursery, each subblock contained 90 polyethylene bags filled with local soil containing

Table 3 Means ± SE for seed characteristics for each seed size of *Pterocarpus erinaceus*

Size	Mass (g)	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)	Shape index
Large (Mini–Maxi)	0.09 ± 0.01 ^a (0.08–0.15)	9.88 ± 0.58 ^a (9.04–11.7)	5.80 ± 0.28 ^a (5.4–6.61)	2.47 ± 0.30 ^a (1.91–3.59)	0.59 ± 0.03 ^a (0.49–0.65)
Medium (Mini–Maxi)	0.07 ± 0.004 ^b (0.06–0.07)	8.98 ± 0.39 ^b (8.33–9.8)	5.34 ± 0.23 ^b (4.7–5.75)	2.18 ± 0.23 ^b (1.88–2.65)	0.59 ± 0.04 ^a (0.51–0.67)
Small (Mini–Maxi)	0.04 ± 0.009 ^c (0.01–0.05)	7.59 ± 0.55 ^c (6.15–8.76)	4.82 ± 0.48 ^c (3.29–5.78)	1.97 ± 0.21 ^c (1.67–2.66)	0.63 ± 0.05 ^a (0.44–0.72)
<i>Pr > F</i>	0.0001	0.0001	0.0001	0.0002	0.6973

Mini minimum, *Maxi* maximum, *Pr > F* = probability value of significance at the 5% level or probability of acceptance or rejection of the null and alternative hypothesis. In the same column, values with identical letters are statistically identical, while values with different letters are significantly different at the 5% threshold

one each of the three seed-size classes (i.e., one subblock of large seeds, one subblock of medium seeds and one subblock of small seeds). Subsequently, 180 seeds per size category were selected at random, soaked in water to break seed dormancy, then sown at a depth of 2 cm at a rate of two seeds per black bag in each subblock giving 2 seeds \times 90 black bags \times 3 size categories of seeds or 180 large seeds + 180 medium seeds + 180 small seeds = 540 seeds per nursery. The same design was used at the two study sites. The seeds were treated with granulated FURADAN against rodents. After the emergence of the seedlings, the pre-leaves were treated with DECIS to limit insect attack. Maintenance in the nurseries consisted of daily watering and manual weeding.

Variables assessed

Germination

germination was tested for the three seed categories and the following variables evaluated: (1) Germination time or latency: the time until first seed germinated after sowing (Amani et al. 2015; Douma et al. 2019); (2) germination delay: time from sowing until germination for each seed (N'golo et al. 2018; Douma et al. 2019); (3) germination speed: average time until 50% of the seeds had germinated (Berka and Abdelkader 2001; Diatta et al. 2009; Douma et al. 2019); (4) duration of germination: period between the time that the first seed germinated until the last seed germinated (Amani et al. 2015; Douma et al. 2019); (5) germination rate: the percentage of germinated seeds among the total number of seeds sown (Zerbo et al. 2010; Souza and Fagundes 2014; Gorgon et al. 2015); and, (6) germination dynamics: cumulative number of seeds that germinated daily and periodically throughout the germination period (Samreen and Shahid 2000; Akaffou et al. 2021).

Seedling growth

After germination, 60 seedlings were randomly selected from each subblock (provenance of seed category) and each study site for a 4-month follow-up: 60 from the germination of large seeds, 60 from the germination of medium seeds, and 60 from the germination of small seeds per nursery (60 seedlings \times 3 size categories \times 2 study sites = 360 seedlings).

Growth was assessed for 4-month-old seedlings according to the seed provenance category in two phases. First, seedling development and, second, dry biomass of the organs of each seedling (organs were dried in the oven at 60 °C for 72 h stored in silica gel until measurement). The developmental variables measured were height, diameter, number of single and compound leaves on the main stem, root length and root diameter (Samreen and Shahid 2000; Matheus and Marcilio 2014). The variables used to evaluate

dry organ biomass were total seedling dry mass, total leaf dry mass, dry mass of the main stem, and dry mass of the roots of each seedling. All developmental variables were measured using a ruler graduated in centimetres and an electronic calliper graduated in millimetres. All dry biomass was measured using an electronic scale with 0.001 g precision. Next, the dry matter of the leaves was evaluated as the ratio of the oven-dried matter of a leaf in milligrams to its water-saturated fresh mass in grams (Garnier and Navas 2012). This functional leaf trait enables the evaluation of leaf resistance to physical hazards and the recognition of species or individuals associated with productive or highly disturbed environments.

Statistical analyses

Statistical analyses were first performed using one-dimensional descriptive statistics, linkage analysis (correlation, regression, and covariance) and multidimensional analysis (PCA) in XLSTAT 2020 version 7.5 (Addinsoft, Paris, France). All variables were compared using analysis of variance in SAS version 9.4 (SAS Institute, Cary, NC, USA). A Student–Newman–Keuls and a LSD test at the 5% threshold were used for post hoc comparison.

Results

Influence of seed size and study site on seed germination

Our results showed that seed size and site properties had a significant effect on the germination variables. All variables were better in the large seeds grown in the nurseries at the two study sites. However, the large seeds sown in Daloa performed better than the large seeds sown in Korhogo: latency of the large seeds was 3 days in Daloa versus 4 days in Korhogo. The germination delay for each large seed varied between 3 and 20 days (average 7.69 ± 5.52 days) in Daloa and between 5 and 25 days (average 9 ± 4.54 days) in Korhogo. Their germination speed was 6 days in Daloa compared to 8 days in Korhogo. The germination delay for large seeds was 17 days in Daloa versus 21 days in Korhogo. The germination rate was 100% for large seeds sown in Daloa and 82% for large seeds sown in Korhogo. The Daloa site was more favourable for germination of all three seed size classes than the Korhogo site (Fig. 3). For each seed-size category, the daily germination dynamics were more pronounced at the Daloa site (Fig. 4a) than at the Korhogo site (Fig. 4b).

Analysis of the relationship between germination variables showed that regardless of seed type and study site, the germination rate was strongly but negatively correlated

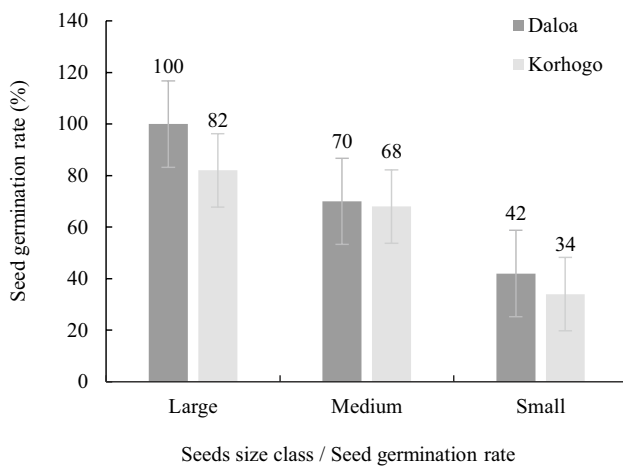


Fig. 3 Effect of seed size and study site on germination rate of three sizes of seeds of *Pterocarpus erinaceus*

with the latency ($r = -0.9043$) and the germination delay ($r = -0.9375$) of all seeds (Table 4). The correlation matrix also showed a strong positive correlation between germination delay and germination latency ($r = -0.9701$).

Influence of seed size and study site on seedling development

Influence of seed size

Comparison of seedling development variables (Table 5) by seed classes showed that all seedlings from the large seeds differed significantly among themselves ($P < 0.05$) but were all significantly more developed than seedlings from the other two seed classes (Table 5).

Influence of study site

The seedlings obtained after 4 months in the nursery in Daloa were more vigorous and well developed than those in the Korhogo nursery (Table 6 and Fig. 5). All the developmental variables differed significantly from one nursery to another ($P < 0.05$).

Aerial parts of the seedling were taller in Daloa than in Korhogo (Fig. 6a), and roots were longer in Korhogo than in Daloa (Fig. 6b).

Fig. 4 Germination dynamics of three sizes of seeds of *Pterocarpus erinaceus* at Daloa (a) and Korhogo (b)

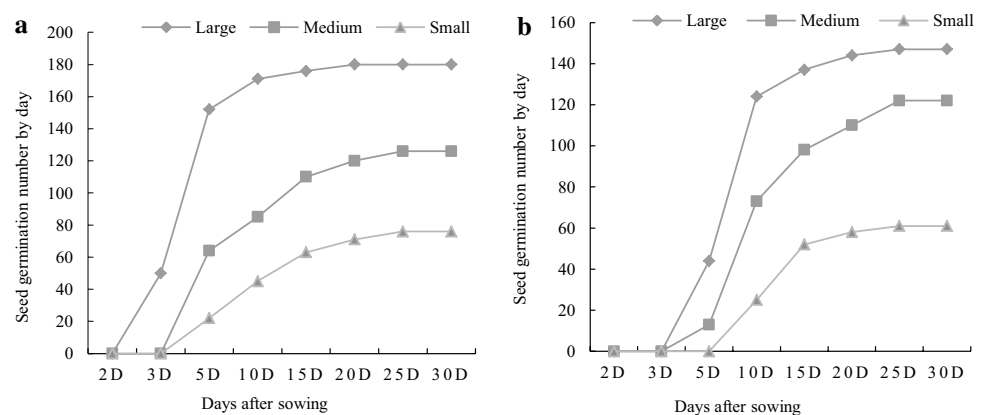


Table 4 Pearson correlation matrix for germination variables for *Pterocarpus erinaceus*

Variable	Latency	Germination delay	Germination speed	Germination duration	Germination rate
Latency	1				
Germination delay	0.9701	1			
Germination speed	-0.4196	-0.5292	1		
Germination duration	0.7895	0.7599	-0.6598	1	
Germination rate	-0.9043	-0.9375	0.6439	-0.6898	1

Values in bold differ from 0 at significance level $\alpha = 0.05$

Table 5 Effect of seed size on the development of 4-month-old *Pterocarpus erinaceus* seedlings

Seed size	Height (cm)	Diameter (mm)	No. of single leaves	No. of compound leaves	Root length (cm)	Root diameter (mm)
Large (Mini–Maxi)	17.41 ± 3.40 ^a (12.4–23.4)	2.11 ± 0.54 ^a (1.33–3.57)	6.92 ± 1.38 ^a (4–10)	0.39 ± 0.68 ^a (0–2)	15.90 ± 2.75 ^a (9.8–21.6)	4.69 ± 1.76 ^a (2.54–8.12)
Medium (Mini–Maxi)	12.33 ± 2.77 ^b (7.2–16.4)	1.66 ± 0.46 ^b (0.78–2.7)	6.25 ± 1.25 ^b (4–9)	0.05 ± 0.23 ^a (0–1)	13.12 ± 3.49 ^b (6.9–19.2)	3.61 ± 1.28 ^b (1.89–5.99)
Small (Mini–Maxi)	8.82 ± 1.71 ^c (5.4–11.6)	1.16 ± 0.37 ^c (0.65–2.24)	5.22 ± 1.08 ^c (3–7)	0 ± 0 ^a (0–0)	10.87 ± 2.95 ^c (5.4–17.2)	2.42 ± 0.97 ^c (1.49–5.28)
<i>Pr</i> > <i>F</i>	0.0001	0.0001	0.0001	0.0002	0.0001	0.0001

Mini minimum, *Maxi* maximum, *Pr* > *F* = probability value of significance at the 5% level or probability of acceptance or rejection of the null and alternative hypothesis. In the same column, values with identical letters are statistically identical, while values with different letters are significantly different at the 5% threshold

Table 6 Effect of study site on development of 4-month-old seedlings of *Pterocarpus erinaceus*

Study site	Seedling height (cm)	Stem diameter (mm)	No. of single leaves	No. of compound leaves	Root length (cm)	Root diameter (mm)
Daloa (Mini–Maxi)	14.13 ± 4.76 ^a (5.4–23.4)	1.78 ± 0.65 ^a (0.68–3.57)	6.7 ± 1.37 ^a (4–10)	0.25 ± 0.55 ^a (0–2)	12.37 ± 3.30 ^b (5.4–20.3)	4.33 ± 1.69 ^a (1.51–8.12)
Korhogo (Mini–Maxi)	11.13 ± 3.26 ^b (5.8–17.3)	1.50 ± 0.43 ^b (0.65–2.25)	5.28 ± 1.01 ^b (3–8)	0 ± 0 ^b (0–0)	14.96 ± 3.76 ^a (6.1–21.6)	2.46 ± 0.70 ^b (1.49–4.34)
<i>Pr</i> > <i>F</i>	0.0003	0.0063	0.0001	0.0041	0.0003	0.0001

Mini minimum, *Maxi* maximum, *Pr* > *F* = probability value of significance at the 5% level or probability of acceptance or rejection of the null and alternative hypothesis. In the same column, values with identical letters are statistically identical, while values with different letters are significantly different at the 5% threshold

Influence of seed size and study site on seedling dry biomass

Influence of seed size

Table 7 shows the dry biomass of the organs of the young seedlings from the three sizes of seed. The organ dry biomass of all the seedlings originating from all three seed sizes differed statistically from one another ($P < 0.05$) except for leaf resistance (leaf dry matter content), which was statistically identical in the three size classes ($P > 0.05$). All seedlings from large seeds weighed more than the other seedlings from the two other seed sizes, and the smaller the seed size, the lower the organ dry mass.

The models in Fig. 7 illustrates the relationships between fresh and dry leaf biomass of seedlings and the seed sizes indicate that the amount of water in the leaves is more stable in seedlings from medium and small seeds than the more variable water content in leaves of seedlings from large seeds. In addition, the higher the fresh leaf mass of the leaves of seedlings from medium and small seeds, the higher is the corresponding dry leaf mass, whereas this is not often the case of leaves of seedlings grown from large seeds (non-linear regression).

Figure 8 shows the projection of the location of the three categories of seedlings and biomass types on axes 1 and 2 of

the PCA (biplot). Analysis of the weight factor matrix enabled extraction of two components that explain 99.59% of total variability, and consequently the total variation among the three categories of seedlings and their corresponding organ biomasses. Plane 1–2 is characterised by eigenvalues of 98.75% for the F1 axis and 0.85% for the F2 axis. The different descriptors contributing to the formation of the first (F1) and second component (F2) form a single group consisting of seedlings germinated from large seeds in the Daloa nursery, and were characterised by greater fresh and dry biomass than all other categories of seedlings.

Influence of the study site

Young plants raised in the Daloa nursery had the highest organ masses (Table 8). All dry masses of all organs of seedlings growing in Daloa differed significantly ($P < 0.05$) from the dry masses of seedlings grown in Korhogo. In contrast, leaf resistance did not differ significantly between the sites, and leaves had similar dry matter content regardless of the site and seed size class.

Figure 9 shows differences in the moisture content of leaves on the stem of seedlings grown in Daloa (Fig. 9a), Korhogo (Fig. 9b) and in the two study sites (Fig. 9c), and the relationship between total fresh mass and total dry mass of the seedlings (Fig. 9d). Figure 9 also shows

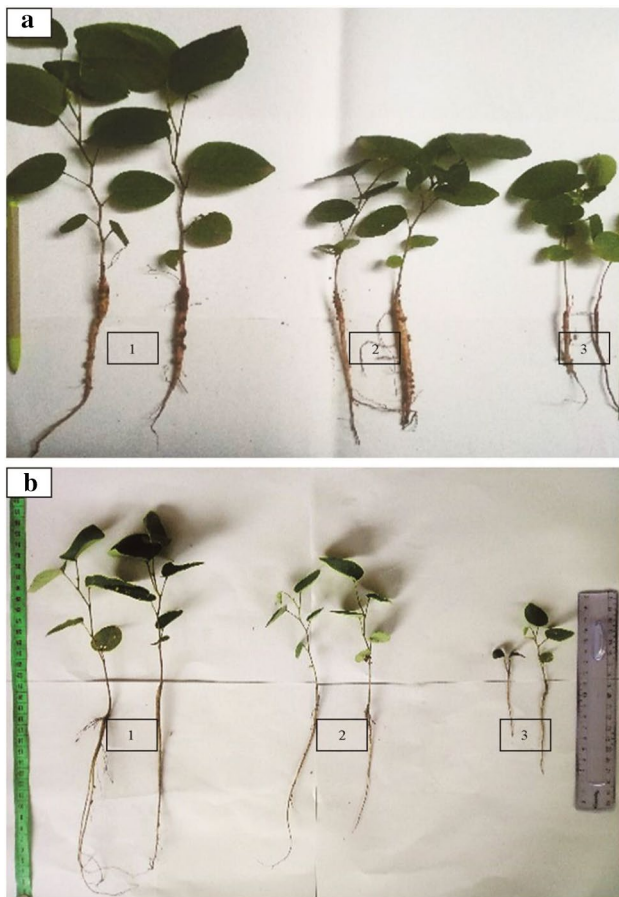


Fig. 5 Vigour of 4-month-old seedlings from large (1), medium (2) and small seeds (3) of *Pterocarpus erinaceus* at Daloa (a) and Korhogo (b)

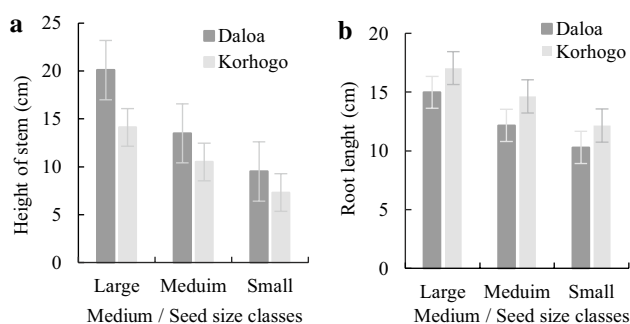


Fig. 6 Height of stems (a) and length of roots (b) of 4-month-old plants from different seed sizes of *Pterocarpus erinaceus* at Daloa and Korhogo according to the size of original seed

that the moisture content of the leaves was more stable in Korhogo than in Daloa and that the higher the fresh mass of the seedlings, the higher the corresponding dry mass.

Discussion

The shape and mass of seeds are essential characteristics that can affect the regeneration of plant stands. In this study, the different seed sizes led to significant differences in the germination and the 4-month growth of the young seedlings.

Seed germination

The germination rates of the three seed sizes ranged from 42 to 100% in 20 days in Daloa (Guinean-humid zone) and from 34 to 82% in 33 days in Korhogo (Sudano-dry zone). In the studies of Adou et al. (2013) and N'golo et al. (2018), the maximum germination rates of seeds of *P. erinaceus* were 29% in the south and 68.5% in the north of the Côte d'Ivoire. In contrast, in Togo, Johnson et al. (2020) obtained moderately high rates ranging from 77 to 92% for the different provenance of this species over 15 days (82% in the Sudano-dry zone, 92% in the Guinean-humid zone, and 77% in Sudano-Guinean semi-humid zone). The results of the studies in Togo are comparable with our results because the study areas are practically the same.

The larger the seed size the higher was the germination rate at all study sites since larger seeds have greater starch reserves in the embryo. The same phenomena has been reported in studies by Chacon et al. (1998) on *Cryptocarpa alba* in Chile, by Mao et al. (2019) on *Pinus thunbergii* in China, by Gunaga et al. (2007) on *Pongania pinnata* and *Vateria indica* and by Pommel (1990) in a greenhouse study of maize in France. In addition, Gunaga and Vasudeva (2011) showed that large seeds of *Mannea suriga* have a dormancy break and a rapid, very high germination rate due to the high concentrations of carbohydrates, gibberellic acid (GA) and other nutrients compared with medium and small seeds. The induction and release of primary or secondary dormancy are controlled by different mechanisms including complex interactions between the environment and abscisic acid (ABA), and gibberellins such as gibberellic acid (GA). ABA promotes the induction and maintenance of dormancy during embryonic maturation (Finkelstein et al. 2008). Gibberellins, on the other hand, promote the breaking of dormancy and germination (Finkelstein et al. 2008) in several plant species. This group of hormones stimulate germination by producing hydrolytic enzymes that weaken the barriers formed by tissues like the endosperm or seed coat by mobilizing seed storage reserves and by stimulating the development of the embryo. Consequently, the greater the carbohydrate reserves in big seeds, the more the development of the embryo is stimulated leading to germination of the seed. The hormonal balance theory has been proposed that dormancy and germination depend on the accumulation and balance of ABA and GA (N'Dri et al., 2011). Environmental signals regulate this balance by altering the expression of

Table 7 Effect of seed size on the biomass of 4-month-old *Pterocarpus erinaceus* seedlings

Seed size	Total plant dry mass (g)	Total leaf dry mass (g)	Stem dry mass (g)	Root dry mass (g)	Leaf dry matter content (mg g ⁻¹)
Large (Mini–Maxi)	0.91 ± 0.58 ^a (0.26–2.31)	0.35 ± 0.24 ^a (0.10–1.41)	0.08 ± 0.04 ^a (0.03–0.21)	0.47 ± 0.35 ^a (0.07–1.44)	360.07 ± 34.31 ^a (288.89–446.43)
Medium (Mini–Maxi)	0.53 ± 0.31 ^b (0.10–1.22)	0.18 ± 0.07 ^b (0.05–0.31)	0.06 ± 0.03 ^b (0.01–0.12)	0.29 ± 0.23 ^b (0.04–0.86)	353.45 ± 33.13 ^a (301.20–450.00)
Small (Mini–Maxi)	0.25 ± 0.17 ^c (0.07–0.80)	0.09 ± 0.05 ^c (0.03–0.24)	0.03 ± 0.01 ^c (0.01–0.08)	0.12 ± 0.11 ^c (0.02–0.58)	360.65 ± 52.49 ^a (263.16–545.45)
<i>Pr</i> > <i>F</i>	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.229

Mini minimum, *Maxi* maximum, *Pr* > *F* = probability value of significance at the 5% level or probability of acceptance or rejection of the null and alternative hypothesis. In the same column, values with identical letters are statistically identical, while values with different letters are significantly different at the 5% threshold

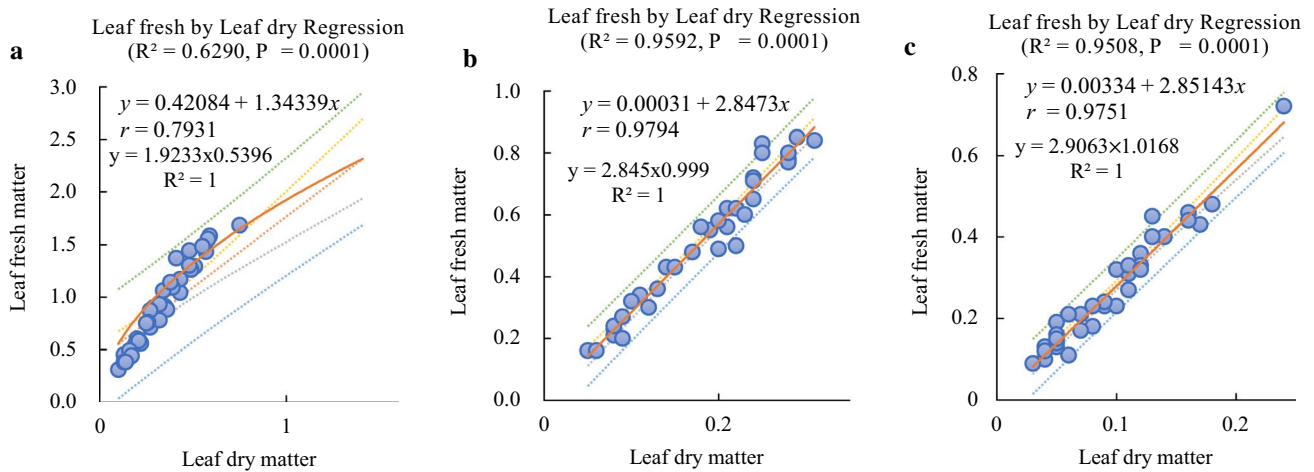


Fig. 7 Relationship between leaf fresh mass and leaf dry mass of 4-month-old plants grown from large (a), medium (b) and small seeds (c) of *Pterocarpus erinaceus*

Fig. 8 Projection of nursery seedling categories and organ biomass types on axes 1 and 2 of the principal component analysis

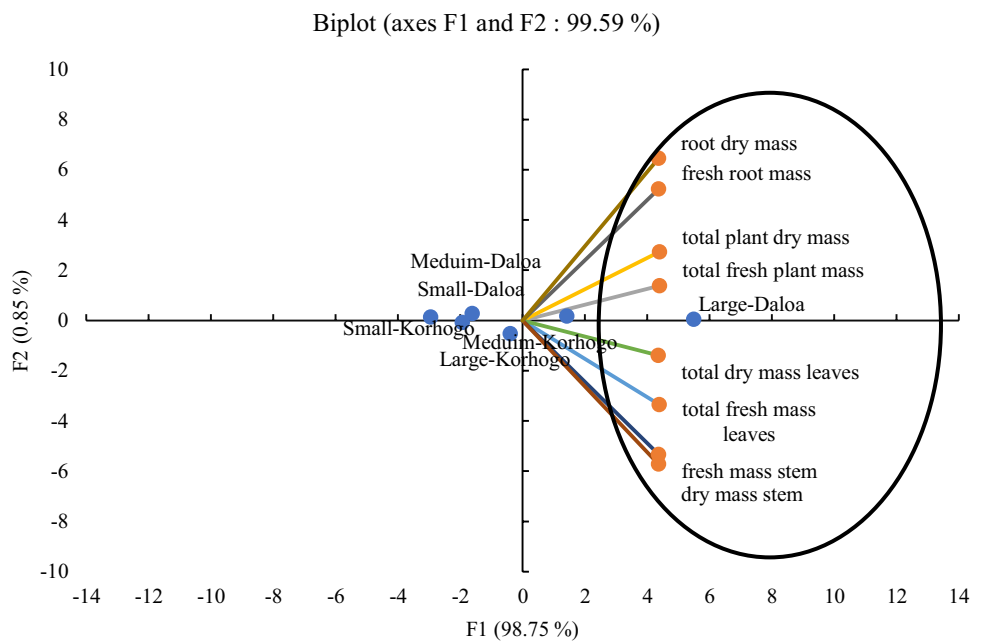


Table 8 Effect of the study site on the biomass of 4-month-old *Pterocarpus erinaceus* seedlings

Study site	Total plant dry mass (g)	Total leaves dry mass (g)	Stem dry mass (g)	Root dry mass (g)	Leaf dry matter content (mg. g ⁻¹)
Daloa (Mini–Maxi)	0.76 ± 0.52 ^a (0.12–2.31)	0.27 ± 0.21 ^a (0.04–1.41)	0.07 ± 0.04 ^a (0.01–0.21)	0.42 ± 0.32 ^a (0.04–1.44)	363.66 ± 43.45 ^a (263.16–545.45)
Korhogo (Mini–Maxi)	0.28 ± 0.14 ^b (0.07–0.6)	0.12 ± 0.06 ^b (0.03–0.27)	0.04 ± 0.02 ^b (0.01–0.1)	0.11 ± 0.07 ^b (0.02–0.28)	349.17 ± 33.80 ^a (285.71–450)
<i>Pr</i> > <i>F</i>	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.1621

Mini minimum, *Maxi* maximum, *Pr* > *F* = probability value of significance at the 5% level or probability of acceptance or rejection of the null and alternative hypothesis. In the same column, values with identical letters are statistically identical, while values with different letters are significantly different at the 5% threshold

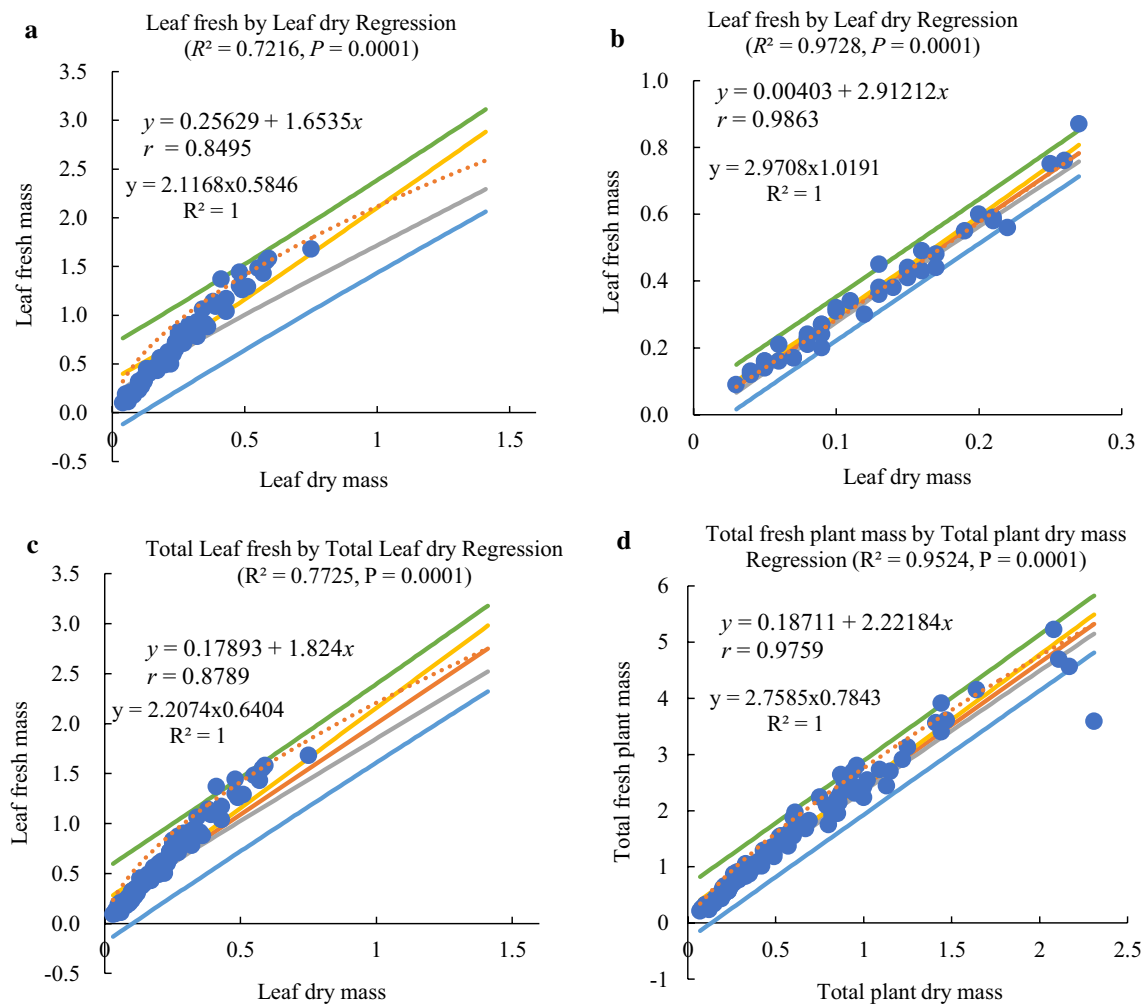


Fig. 9 Relationship between leaf fresh mass and leaf dry mass in Daloa (a), in Korhogo (b), between total leaf fresh mass and total leaf dry mass (c) and between total fresh plant mass and total plant dry mass (d)

catabolic and biosynthetic enzymes (Finkelstein et al. 2008). Germination is therefore characterised by an increase in GA biosynthesis and the degradation of ABA (Finch-Savage and Leubner-Metzger 2006).

However, there may be exceptions to the rule, because large seeds do not guarantee the highest germination rates with good seedling vigour for all species. Dar et al. (2002) showed that medium-sized seeds produced better

germination and high seedling vigour than larger seeds and smaller seeds in *Acacia catechu*, *Pinus roxburghii*, *Albizia lebbek* and *Robinia pseudoacacia*. Under the same climate and soil conditions, experimental conditions, Malavasi and Malavasi (1996) and Agboola (1996) showed that, in certain tropical tree species, seed size had no influence on germination and seedling vigour. In Daloa, germination rates were higher in all seed size groups than in Korhogo. We believe this difference is due to the type of potting soil used in the bags and the local climate in Daloa and Korhogo; the soil at Korhogo is poor in organic matter and subject to an arid tropical dry climate that can increase soil salinity, whereas Daloa is a forested area with humus-rich soil and a humid tropical climate. The beneficial effects of soil type on germination have been shown in several studies, such as that of Aparicio et al. (2002). In the same context, Alaoui et al. (2013) and Tian et al. (2014) showed that saline stress had a negative effect on seed germination. The results showed that the germination latency time (germination of the first seed among a batch of sown seeds) was positively correlated with the germination delay (time between planting and germination for each seed of the considered batch) ($r=0.9701$). This means that for a given seed lot, the faster the germination of the first seed, the faster all the seeds in that lot germinate. The correlation matrix also showed that the germination rate was negatively correlated with latency ($r=-0.9043$) and with germination delay ($r=-0.9375$). Thus, the higher the seed germination rate, the shorter were the germination latency germination delay for each seed. Indeed, Mao et al. (2019) showed that the vigour index and germination rate were negatively correlated with the average germination time.

Seedling growth

Our results showed that, regardless of the size of the original seed, none of the seedlings grown in Korhogo (Sudano-dry zone) had any compound leaves after four months. In contrast, the seedlings grown in Daloa (Guinean-humid zone) were more vigorous, regardless of the size of the seed, but the roots were longer in Korhogo than in Daloa. In our opinion, these facts are also due to the different types of soil and climate at the two sites. The rich soils and wet climate of Daloa produced larger, more vigorous, mature seedlings. In their studies, Maranz and Wiesman (2003) and Soloviev et al. (2004) reported that the climate and/or the ecological gradient had an effect on seedling morphology. Similarly, Salazar and Quesada (1987) and Assogbadjo et al. (2005, 2006) showed that the origin of differences in seedling morphology included soil type, and the age and genetic characteristics of the mother trees. Salt-rich acidic soils also can have a negative effect on plant growth (Alaoui et al. 2013). However, Dianda and Chalifour (2002) reported that the

climatic zone of origin had no impact on seedling growth; only the age and genetic background of the mother tree had a significant effect on seedling morphology. It should be noted that although the seedlings appeared to be more vigorous at Daloa than at Korhogo, the seedlings at Korhogo had longer roots than the seedlings at Daloa, regardless of the size of the original seed, which can be explained by differences in the water regime. In Korhogo, the soil dries out rapidly after the seedlings have been watered due to lower relative humidity, higher temperatures, and higher sand content in the soil. A few hours after watering, the water evaporates by evapotranspiration or infiltrates into the deeper soil layers by percolation; the roots are therefore forced to extend deeper into the soil. Douma et al. (2019) already reported this phenomenon in *Parkia biglobosa*. As we mentioned earlier, not all young plants that germinated from small seeds developed compound leaves, but young plants that germinated from large seeds were better developed than seeds that germinated from other seed categories, regardless of the study site. Results of studies by Aparicio et al. (2002), Chacon et al. (1998), Mao et al. (2019), Gunaga and Vasudeva (2011), Gunaga et al. (2007), Rahman and Bourdu (1986) and Pommel (1990) are similar. However, Dar et al (2002) reported contradictory results; seedlings from medium-sized seeds were larger and more vigorous than seedlings from small and large seeds. On the other hand, Malavasi and Malavasi (1996) and Agboola (1996) reported that seed size does not influence seedling shape and vigour in certain tropical tree species.

Analysis of variance of the dry biomass of the organs evaluated in our study revealed significant differences between the two study sites as well as between the seedlings resulting from germination of the three sizes of seeds. Overall, our results showed that the seedlings at Daloa had higher organ masses than those at Korhogo. Once again, the soil and climate at Daloa allowed the seedlings to store more dry matter regardless of whether the seedling germinated from seeds of different sizes. At both study sites, seed size did influence the biomass of the seedlings; the larger the seeds, the greater was the biomass. However, the seedlings that germinated from large seeds at Daloa weighed more than the seedlings from large seeds at Korhogo. Several other studies have confirmed the positive effect of seed size on seedling vigour and biomass, e.g., Aparicio et al. (2002) on durum wheat in Spain, Chacon et al (1998) on *Cryptocarya alba* in Chile, Mao et al (2019) on *Pinus thunbergii* in China, and Gunaga and Vasudeva (2011) on *Mannea suriga* in India, Gunaga et al. (2007) on *Pongania pinnata* and *Vateria indica* in India, Alaoui et al. (2013) on wheat in Morocco, Rahman and Bourdu (1986) on maize seedlings and Pommel (1990) on maize seedlings in greenhouses in France. In our study, leaf water content showed a linear regression with good fit between fresh and dry leaf mass of seedlings from medium and small seeds for the set of leaves, whereas

the leaf water content of the seedlings from the large seedlings had a poor fit. These results imply that seedlings from medium and small seeds germination had more stable water quantities, and less water was wasted through evaporation during photosynthesis than from the large seeds, explaining why seedlings from medium and small seeds were smaller and less vigorous than seedlings from large seeds. In fact, the more water lost through the leaves, the higher the photosynthetic activity, the more starch (dry matter) produced and stored and hence, the more vigorous the plants. Similarly, our results showed a linear regression in water content between fresh and dry leaves of all the seedlings at Korhogo, in contrast to the seedlings at Daloa (non-linear adjustment). Thus, Daloa seedlings had a highly variable and unstable water content and therefore stored less water in their leaves, in contrast to the leaves of seedlings grown in Korhogo, where the hydric stress on seedlings forces them to conserve more water, photosynthetic activity is therefore, resulting in stressed and less vigorous seedlings than at Daloa. Evaluation of the leaf dry matter content (LDMC) showed that the leaves of all the seedlings we evaluated had identical resistance regardless of the size of the original seed or the study site. This phenomenon can be explained by the seedlings being the same species. The LDMC evaluated in this study is very important as it provides clues to productive or disturbed environments and to the decomposition of leaf litter. Indeed, Garnier and Navas (2012) indicated that leaves with high LDMC tend to be relatively resistant and are assumed to be more resistant to physical hazards (e.g., herbivory, wind) than leaves with low LDMC. They also mentioned that some aspects of the relationship between leaves and water and flammability also depend on LDMC. Low LDMC species tend to be associated with less productive, often highly disturbed environments. In addition, leaf litter from high-LDMC leaves tends to decompose more slowly than litter from low-LDMC leaves.

Conclusion

This study confirmed that large seeds are both a tool and a selection criterion for sexual regeneration and the establishment of permanent plots to rapidly and effectively safeguard certain endangered species such as *Pterocarpus erinaceus*. We showed that large seeds of *P. erinaceus* have very high germination rates (up to 100%) and produce more vigorous plants better able to adapt to and resist climate change. The maternal environment and seed size had a significant influence on germination ($P < 0.05$) and seedling development ($P < 0.05$) and biomass ($P < 0.05$). Seedlings from large seeds were more resistant to water and environmental stress, especially in an environment with rich soil and a humid tropical climate. The leaves had the same resistance

regardless of the size of the seeds and the study site, but leaf moisture content was more stable in seedlings grown from medium and small seeds. These results are decision support tools and key factors for rural populations, loggers, state forest management structures for silviculture of the species *P. erinaceus*. This study should now be extended to other threatened species (CITES or the IUCN Red List).

References

- Adji BI, Akaffou SD, Kouassi KH, Houphouet YP, Duminil J, Sabatier S (2020) Bioclimate influence on seed germination and seedling morphology parameters in *Pterocarpus erinaceus* Poir., 1804 (Fabaceae). *Int J Environ Agric Biotechnol* 6(3):2456–1878
- Adou K, Konan KJC, Diarra F (2013) Note sur le Vène (Premiers résultats de travaux de recherche sur le vène, à la sodefor), 2 p. <http://ci.chmcbd.net/biodiversity/fauneflore/flore/flore-terrestre/note-sur-le-vene.25oct12.doc/download/fr-BE/1>
- Agboola DA (1996) The effect of seed size on germination and seedling growth of three tropical tree species. *J Trop for Sci* 9(1):44–51
- Akaffou SD, Kouamé KA, Gore BBN, Abessika YG, Kouassi KH, Hamon P, Sabatier S, Duminil J (2021) Effect of the seeds provenance and treatment on the germination rate and plants growth of four forest trees species of Côte d'Ivoire. *J for Res* 32:161–169
- Ake AL (1999) Effets de l'exploitation forestière sur la conservation de la diversité biologique en Afrique de l'Ouest: le cas de la Côte d'Ivoire. In: Ouédraogo AS, Boffa JM (eds) Vers une approche régionale des ressources génétiques en Afrique Sub-Saharienne. Actes du premier atelier régional de formation sur la conservation et l'utilisation durable des Ressources Génétiques Forestières en Afrique de l'Ouest. Afrique Centrale et Madagascar. Mars 1998. Ouagadougou. CNSF/IPGRI, pp 101–106. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00386032/document>
- Alaoui MM, Jourmi LE, Ouarzane A, Lazar S, Antri SE, Zahouily M, Hmyene A (2013) Effet du stress salin sur la germination et la croissance de six variétés marocaines de blé (Effect of salt stress on germination and growth of six Moroccan wheat varieties). *J Mater Environ Sci* 4(6):997–1004
- Amani A, Inoussa MM, Dan-Guimbo I, Mahamane A, Saadou M, Lykke AM (2015) Germination et croissance de quatre espèces de Combretaceae en pépinière. *Tropicultura* 33(2):123–145
- Aparicio N, Villegas D, Araus JL, Blanco R, Royo C (2002) Seedling development and biomass as affected by seed size and morphology in durum wheat. *J Agric Sci* 139:143–150
- Assogbadjo AE, Sinsin B, Codjia JTC, Van-Damme P (2005) Ecological diversity and pulp, seed and kernel production of the baobab (*Adansonia digitata*) in Benin. *Belg J Bot* 138(1):47–56
- Assogbadjo AE, Kyndt T, Sinsin B, Gheysen G, Van-Damme P (2006) Patterns of genetic and morphometric diversity in baobab (*Adansonia digitata* L.) populations across different climatic zones of Benin (West Africa). *Ann Bot* 97:819–830
- Bakayoko A, Khatelain C, Kone MW, Kone I, Ouattara D, Yao K, Gautier L (2020) Occurrences des échantillons de plantes de l'Herbier du Centre Suisse de Recherches Scientifiques (CSRS) en Côte d'Ivoire. Version 1.2. Centre Suisse de Recherches Scientifiques en Côte d'Ivoire. Occurrence dataset <https://doi.org/10.15468/gdbrsj> Ajouter au projet Citavi par DOI accessed via GBIF.org on 2021-03-05
- Berka S, Abdelkader H (2001) Effets de quelques traitements physico-chimiques et de la température sur la faculté germinative de la graine d'Arganier. *Revue Forestière Française* 53(2):125–130

- Chacon P, Bustamante R, Henriquez C (1998) The effect of seed size on germination and seedling growth of *Cryptocarya alba* (Lauraceae) in Chile. *Rev Chil Hist Nat* 71:189–197
- Choat B, Jansen S, Brodribb TJ, Cochard H, Delzon S, Bhaskar R, Bucci SJ, Feild TS, Gleason SM, Hacke UG, Jacobsen AL, Lens F, Maherali H, Martinez-Vilalta J, Mayr S, Mencuccini M, Mitchell PJ, Nardini A, Pittermann J, Pratt RB, Sperry JS, Westoby M, Wright IJ, Zanne AE (2012) Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature* 491(7426):752–755
- CITES-Secrétariat (2016) Notification of the Parties No. 2016/008. [https://cites.org/sites/default/files/notif/E Notif 2016 008.pdf](https://cites.org/sites/default/files/notif/E%20Notif%202016%20008.pdf)
- CoP17-Prop. xx (2016) Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction. «dix-septième session de la conférence des parties Johannesburg (Afrique du sud); 24 septembre 5 octobre 2016: examen des propositions d'amendement des annexes I et II», 17 p. https://cites.org/sites/default/files/eng/cop/17/prop/CAR_SN_pangolins_F.pdf
- Dar FA, Gera M, Gera N (2002) Effect of seed grading on germination pattern of some multi purpose tree species of Jammu region. *Indian for* 128:509–512
- Dianda M, Chalifour FP (2002) Effets du N minéral et du génotype de la plante sur la croissance et la nodulation de *Faidherbia albida*. *Can J Bot* 80(3):241–254
- Diatta S, Salifou I, Sy MO, Kabore-Zougrana CY, Banoin M, Akpo LE (2009) Évaluation des potentialités germinatives d'un ligneux fourrager sahélien: *Maerua crassifolia* Forssk, Caparaceae, pp 1–11
- Douma S, Adamou MM, Aboubacar K, Alleidi I, Boubacar AN (2019) Effet du régime d'irrigation sur la germination et la croissance en pépinière de *Parkia biglobosa* (Jacq.) G. Don. *J Anim Plant Sci* 40(1):6573–6583
- Dumenu WK (2019) Assessing the impact of felling/export ban and CITES designation on exploitation of African rosewood (*Pterocarpus erinaceus*). *Biol Conserv* 236:124–133
- Finch-Savage EW, Leubner-Metzger G (2006) Seed dormancy and the control of germination. *New Phytol* 171:501–523
- Finkelstein R, Reeves W, Ariizumi T, Steber C (2008) Molecular aspects of seed dormancy. *Ann Rev Plant Biol* 59:387–415
- Garnier E, Navas ML (2012) Trait-based approach to comparative functional plant ecology: concepts, methods and applications for agroecology. *Agron Sustain Dev* 32:365–399
- Gorgon IT, Olga DY, Komla EA, Francois W, Kouami K (2015) Essai de germination et de croissance au stade juvénile des souches locales de *Jatropha curcas* en république centre africaine. *Eur Sci J* 11(15):260–276
- Guillaumet JL, Adjahoun E, Avenard JM, Eldin M, Girard G, Circoulin J, Toucheboeuf P, Perraud A (1971) Le milieu naturel de Côte d'Ivoire. *Mém. ORSTOM no50*. ORSTOM, Paris, pp 156–264. <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:16372>
- Gunaga R, Vasudeva R (2011) Influence of seed size on germination and seedling growth in *Mammea suriga*. *Karnataka J Agric Sci* 24(3):415–416
- Gunaga RP, Hareesh TS, Vasudeva R (2007) Effect of fruit size on early seedling vigour and Biomass in White Dammer (*Vateria indica*): a vulnerable and economically important tree species of the Western Ghats. *J Non-Timber for Prod* 14:197–200
- Héroult B, Anatole KN, N'klo O, Assandé A, Fabrice B, Brahim C, Doua-Bi Y, Koffi Y, Koffi KJC, Konaté I, Tiéoulé F, Wourro F, Zo-Bi IC, Louppe D (2020) The long-term performance of 35 tree species of Sudanian West Africa in pure and mixed plantings. *For Ecol Manage* 468:118171. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118171>
- Houndonougbo JSH, Kassa B, Mensah S, Salako VK, Glèlè-Kakaï R, Assogbadjo AE (2020) A global systematic review on conservation and domestication of *Parkia biglobosa* (Jacq.) R. Br. ex G. Don, an indigenous fruit tree species in Sub-Sahara African traditional parklands: current knowledge and future directions. *Genet Resour Crop Evol* 67:1051–1066
- Johnson BN, Quashie AML, Adjonou K, Segla KN, Kokutse AD, Kokou K (2020) Characterization of germination and growth of *Pterocarpus erinaceus* Poir. from Togo. *Int J Sci Res* 9(10):1744–1754
- Koffi KJ, Kouassi AF, Ake-assi AE, Yao K, N'goran KSB, N'Goran B (2018) Liste de quelques espèces à statuts particuliers de l'herbier du Centre National de Floristique (CNF) en Côte d'Ivoire. Version 1.2. Centre National de Floristique. Occurrence dataset <https://doi.org/10.15468/ckbuue>. Ajouter au projet Citavi par DOI accessed via GBIF.org on 2021-03-05
- Kossi NS, Kossi A, Abdou RR, Adzo DK, Kouami K, Rabiou H, Pouwisawe K, Babou AB, Ali M (2015) Importance socio-économique de *pterocarpus erinaceus* poir. au Togo. *Eur Sci J* 23(11):135–145
- Louppe D, Ouattara N (1996) Les arboretums d'espèces locales en Nord Côte d'Ivoire. IDEFOR, 14 p. <http://agritrop.cirad.fr/581418/>
- Malavasi M, Malavasi UC (1996) Effect of seed size on seedling growth of a shade-tolerant tropical tree (*Hymanea stilbocarpa* Haynes). *Tree Plant Notice* 46:130–133
- Mao P, Guo L, Gao Y, Qi L, Cao B (2019) Effects of seed size and sand burial on germination and early growth of seedlings for coastal *Pinus thunbergii* Parl. in the Northern Shandong Peninsula, China. *Forests* 10(3):281
- Maranz S, Wiesman Z (2003) Evidence for indigenous selection and distribution of the shea tree, *Vitellaria paradoxa*, and its potential significance to prevailing parkland savanna tree patterns in sub-Saharan Africa north of the equator. *Glob Biogeogr* 30:1505–1516
- Matheus S, Marcilio F (2014) Seed size as key factor in germination and seedling development of *Copaifera langsdorffii* (Fabaceae). *Am J Plant Sci* 5:2566–2573. <https://doi.org/10.4236/ajps.2014.517270>
- Mbowa C, Chhinb S, Samboua B, Skolec D (2013) Potential of dendrochronology to assess annual rates of biomass productivity in savanna trees of West Africa. *Dendrochronologia* 31:41–51
- Millogo AMD (2014) Etudes des caractéristiques morphologiques et de la viabilité des semences de *Parkia biglobosa* (jacq.) r. br. ex g. don. - germoplasme de conservation a long terme a 4 °C. Mémoire de Master (Burkina Faso): Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso. 61 p. <http://www.beep.ird.fr/collect/upb/index/assoc/IDR-2014-MIL-ETU/IDR-2014-MIL-ETU.pdf>
- MINEF (2013) Décret n° 2013-508 du 25 juillet 2013 portant interdiction de l'exploitation, de la coupe, du transport, de la commercialisation et de l'exportation de *Pterocarpus* spp appelé communément «bois de vène». *Journal Officiel de la République de Côte d'Ivoire*, 22 août 2013:532–533
- N'Dri AAN, Vroh-bi I, Kouamé PL, Zoro-bi I (2011) Bases génétiques et biochimiques de la capacité germinative des graines: implications pour les systèmes semenciers et la production alimentaire. *Sci Nat* 8(1):119–137
- N'golo B, Noufou DO, Djézou K, Adama B, Fezan HT (2018) Effets de cinq prétraitements sur la germination du vène (*Pterocarpus erinaceus* Poir., Fabaceae) dans la Réserve du Haut Bandama (Côte d'Ivoire). *Eur Sci J* 30(14):438–453
- Pommel B (1990) Influence du poids de la semence et de la profondeur de semis sur la croissance et le développement de la plantule de maïs. *Agronomie* 10:699–708
- Rabiou H, Diouf A, Bationo AB, Segla NK, Adjonou K, Kokutse DA, Radji R, Kokou K, Mahamane A, Saadou M (2015) Structure des peuplements naturels de *Pterocarpus erinaceus* Poir. dans le domaine soudanien, au Niger et au Burkina Faso. *Bois et forêts des tropiques* 325(3):71–125

- Rahman NAE, Bourdu R (1986) Effet de la taille et de la forme des grains sur quelques caractéristiques du développement du maïs au stade jeune. *Agronomie* 6(2):181–186
- Salazar R, Quesada M (1987) Provenance variation in *Guazuma ulmifolia* L. in Costa Rica. *Commonw for Rev* 66:317–324
- Samreen S, Shahid SS (2000) Effect of seed size on germination, emergence, growth and seedling survival of *Senna occidentalis* Link. *Pak J Biol Sci* 3(2):292–295
- Segla NK, Rabiou H, Adjonou K, Moussa BM, Saley K, Radji RA, Kokutse AD, Bationo AB, Mahamane A, Kokou K (2016) Population structure and minimum felling diameter of *Pterocarpus erinaceus* Poir in arid and semi-arid climate zones of West Africa. *S Afr J Bot* 103:17–24
- Segla KN, Adjonou K, Rabiou H, Bationo BA, Mahamane A, Guibal D, Kokou K, Chaix G, Kokutse AD, Langbour P (2020) Relations between the ecological conditions and the properties of *Pterocarpus erinaceus* Poir. wood from the Guinean-Sudanian and Sahelian zones of West Africa. *Holzforschung aop* 11 p. <https://doi.org/10.1515/hf-2019-0250>
- Soloviev P, Niang TD, Gaye A, Totte A (2004) Variabilité des caractères physicochimiques des fruits de trois espèces ligneuses de cueillette, récoltés au Sénégal: *Adansonia digitata*, *Balanites aegyptiaca* et *Tamarindus indica*. *Fruits* 59:109–119
- Souza ML, Fagundes M (2014) Seed size as key factor in germination and seedling development of copment of *Copaifera langsdorffii* (Fabaceae). *Am J Plant Sci* 5:2566–2573
- Tian Y, Guan B, Zhou D, Yu J, Li G, Lou Y (2014) Responses of seed germination, seedling growth, and seed yield traits to seed pretreatment in maize (*Zea mays* L.). *Sci World J* 2014:834630. <https://doi.org/10.1155/2014/834630>
- Walsh D, Lord D (1996) Effets de la masse et de la dimension des graines d'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.) sur le taux de germination et la survie des semis produits en récipients. Département des Sciences Fondamentales et Groupe de Recherche en Productivité Végétale Université du Québec à Chicoutimi Partenaire du Consortium de recherche sur la forêt boréale commerciale Chicoutimi (Québec) G7H 2B1. Project No. 9 520263, 87 p. <https://constellation.uqac.ca/3279/>
- Westoby M, Leishman M, Lord J (1996) Comparative ecology of seed size and dispersal. *Phil Trans R Soc Lond B the Royal Society* 351:1309–1318
- Zerbo P, Belem B, Mllogo-Rasolodimby J, Van-Damme P (2010) Germination sexuée et croissance précoce d'Ozoroainsignis Del., une espèce médicinale du Burkina Faso. *Cameroon J Exp Biol* 6(2):74–80.

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

PUBLICATION 7

Beda Innocent Adji, Doffou Sélastique Akaffou, Véronique Letort, Mengzhen Kang, Xiujuan Wang, Marc Jaeger, Philippe De Reffye, Kouadio Henri Kouassi, Yao Patrice Houphouet, Jérôme Duminil, Yves Caraglio and Sylvie Sabatier. **2022.**

THE ARCHITECTURAL UNIT SETTING UP AND ARCHITECTURAL CHARACTERISTICS OF NERE, *PARKIA BIGLOBOSA*, JACK, R. BR. (FABACEAE). *American Journal of Plant Sciences*, 13, 109-136. <https://doi.org/10.4236/ajps.2022.131008>



HAL
open science

The Architectural Unit Setting up and Architectural Characteristics of Néré, *Parkia biglobosa*, Jack, R. Br. (Fabaceae)

Beda Innocent Adji, Doffou Sélastique Akaffou, Véronique Letort, Mengzhen Kang, Xiujuan Wang, Marc Jaeger, Philippe de Reffye, Kouadio Henri Kouassi, Yao Patrice Houphouet, Jérôme Duminil, et al.

► To cite this version:

Beda Innocent Adji, Doffou Sélastique Akaffou, Véronique Letort, Mengzhen Kang, Xiujuan Wang, et al.. The Architectural Unit Setting up and Architectural Characteristics of Néré, *Parkia biglobosa*, Jack, R. Br. (Fabaceae). *American Journal of Plant Sciences*, Scientific Research Publishing, 2022, 13 (1), pp.109 - 136. 10.4236/ajps.2022.131008 . hal-03546796

HAL Id: hal-03546796

<https://hal.inrae.fr/hal-03546796>

Submitted on 28 Jan 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution| 4.0 International License

The Architectural Unit Setting up and Architectural Characteristics of Néré, *Parkia biglobosa*, Jack, R. Br. (Fabaceae)

Beda Innocent Adji^{1,2#} , Doffou Sélastique Akaffou¹, Véronique Letort³, Mengzhen Kang⁴, Xiujuan Wang⁴, Marc Jaeger², Philippe De Reffye², Kouadio Henri Kouassi¹, Yao Patrice Houphouet¹, Jérôme Duminil⁵, Yves Caraglio², Sylvie Sabatier²

¹Université Jean Lorougnon Guédé, UFR Agroforesterie, Daloa, Côte d'Ivoire

²CIRAD, UMR-botAnique et Modélisation de l'Architecture des Plantes et des végétations (AMAP), Montpellier, France

³MICS, CentraleSupélec-Université Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette, France

⁴Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems (CASIA-LMCCS), Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

⁵IRD, UMR-DIADE, Montpellier, France

Email: #adjibedainnocent@gmail.com

How to cite this paper: Adji, B.I., Akaffou, D.S., Letort, V., Kang, M.Z., Wang, X.J., Jaeger, M., De Reffye, P., Kouassi, K.H., Houphouet, Y.P., Duminil, J., Caraglio, Y. and Sabatier, S. (2022) The Architectural Unit Setting up and Architectural Characteristics of Néré, *Parkia biglobosa*, Jack, R. Br. (Fabaceae). *American Journal of Plant Sciences*, 13, 109-136.

<https://doi.org/10.4236/ajps.2022.131008>

Received: December 10, 2021

Accepted: January 25, 2022

Published: January 28, 2022

Copyright © 2022 by author(s) and Scientific Research Publishing Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Parkia biglobosa is a much-loved and over-exploited African savannah species for its socio-economic importance. Knowing and taking into account its architectural unit, which is the basis for diagnosing phenology, productivity and tree health, could provide a new perspective on its sustainable management. The aim of this study is to establish the architectural development in *Parkia biglobosa* by retrospective analysis. To achieve this objective, 390 individuals of all sizes ranging from seedlings to senescent trees were observed and analysed under various soil and climatic conditions in Côte d'Ivoire. The results showed that *Parkia biglobosa* is a light plant but shading tolerant. It is a mixed vegetative axis plant, the stem is orthotropic* in its proximal part and plagiotropic* (collapsing) in its distal part in young stage. The tree then transitions to an adult and old stage into a tree with a plagiotropic* axis in the proximal and distal parts, the trunk is built up by superimposing collapsed relay axes that gradually straighten, branching is sympodial*, growth is defined and sexuality is terminal and lateral. The ontogeny takes place in three phases: initiation of development and establishment of the crown (young), then flowering and establishment of the architectural unity (adult) and finally the death of secondary axes in the crown, duplication of the architecture by a series of partial and total reiterations (old). The level of organisation is 5: the

In this document, terms marked with an asterisk () are defined in a glossary appended to the article after the references in order to alleviate difficulties of understanding. Indeed, the vocabulary used differs from that commonly used by foresters.

phytomere, the module or growth unit, the axis, the architectural unit and the reiterated complex. Retrospective analysis of the modules showed that the dimensions of the growth units are indicators of morphological variation and species adaptation to a changing climate ($P < 0.05$). However, the equations generated by the morphological and habitat dimension linkage models are not significant (R^2 and $r < 0.7$) to be used as a guide for field data collection. This study represents an initiation into the architectural study of this species and the information provided will serve as a basis for further research into the architecture in relation to the sustainable use of this species.

Keywords

Parkia biglobosa, Architectural Development, Architectural Unit, Côte d'Ivoire

1. Introduction

The architectural* study of a plant is a morphological approach that makes it possible to characterise the organisation of trees or groups of trees growing in different pedoclimatic contexts [1] [2] [3] [4]. In spite of this pedoclimatic variability, it nevertheless allows us to highlight a specific average architectural organisation that constitutes the species' sketch or architectural unit*. This sketch is the architectural expression of the plant that allows it to be visually differentiated from another tree species without having studied it, and in the second instance constitutes the pillar of its sustainable management in case of threat [5] [6] [7]. Indeed, the architectural unit constitutes the smallest stem structure necessary and sufficient for the plant to reach its sexual maturity phase (complete reproduction) and thus complete its life cycle by forming flowers and fruits [8] [9]. The plant then continues its growth by altering this architectural unit through the phenomenon of duplication; a series of axes of different categories are then reproduced in the adult plant [10] [11] [12]. It is, therefore, necessary and important to bring out this architectural unit hidden in the tree, as it is the basis for future diagnostics by foresters or observers to assess the difficulties, phenology, health, productivity and reproducibility of species in various geographical situations under stress or climate change.

Plant architecture* can be achieved through retrospective analysis, which analyses the structure of the plant using various morphological markers that allow the formation and successive increases in length of the axes to be limited and dated. It depends on the spatial and temporal arrangement of the plant parts (branched hierarchical system), and is based on these morphological traits at the shoot and branch level (axes grouped into categories characterised by morphological criteria, exploration and/or reproduction role); then affected by endogenous (genetic) and exogenous (environmental) factors [10] [13]. The growth pattern through which the plant develops its form is the architectural model* of the plant or the basic growth strategy of a plant. The main architectural parameters generally studied are growth, branching, morphological differentiation of

axes and the position of reproductive structures [5] [11].

This discipline has long been recognised as an important scientific tool in horticultural crops, understanding plant function, yield assessment and for the development of crop models [14] [15] [16]. It has been used extensively and successfully in Europe and South America for yield optimisation, forest management, preservation of important species, understanding the adaptation of species to climate, sustainable exploitation and safeguarding of threatened species [1] [2] [6] [7] [17]. However, it has never been applied or applied to emblematic West African species, yet this area is a strategic carbon sink encompassing many important overexploited and threatened species.

This is the case of *Parkia biglobosa*, an agroforestry species indigenous to the savannahs of Africa. This species is much loved by the rural populations of this geographical area for its socio-economic role [18] [19] [20]. As a result, it is one of the most overexploited species among many others, but also the best documented to date [19] [21]. However, its architectural study does not exist in the literature to our knowledge. However, the knowledge of its architectural development sequence, its architectural characteristics and its architectural unity are very important for its phenological diagnosis, the evaluation of its productivity and its preservation. Indeed, in the first step, the architecture of this species completes its biological knowledge and in the second step, it allows access to the structure-function-time-environment relationship and thus can give a new point of view on the sustainable management of this species. The objective of this study is to establish the architectural development in *Parkia biglobosa* via retrospective analysis of various individuals from different environmental conditions in Côte d'Ivoire.

2. Material and Methods

2.1. Trees Studied

390 freely growing individuals in open and forest environments were arbitrarily selected and observed. These individuals of different ages (young, adult and old) were derived from wild individuals of natural regeneration (forest) and artificial regeneration (1- and 2-year-old individuals planted and monitored in a nursery) benefiting from a canopy of variable size. The number of individuals as well as the dendrometric characteristics per age category and environment, and the location of the growth units or modules studied are recorded in **Table 1**.

2.2. Study Sites

The study was carried out in seven locations along a bioecological gradient in Côte d'Ivoire (**Figure 1**). The soil and climate characteristics of the surveyed locations are shown in **Table 2**.

2.3. Observation Methods

2.3.1. Sampling of Individuals

For each stage of tree development (young, adult and old), 10 wild individuals

Table 1. Dendrometric characteristics and number of individuals used according to age and environment.

	Ages	Environments	Tree height (m)			Tree diameter (cm)			Indiv Nber	GU examined
			Min	Max	Mean	Min	Max	Mean		
<i>Parkia biglobosa</i>	Young trees	Opened	0.53	5.5	1.95 ± 0.11 c	0.56	18.96	4.35 ± 0.24 c	60	Main stem
		Closed	0.42	5.8	2.56 ± 0.05 c	1.26	17.83	7.06 ± 1.22 c	60	Main stem
		Nursery	0.44	1.7	0.52 ± 0.11 c	2.1	5.1	3.71 ± 0.21 c	30	Main stem
	Adult trees	Opened	7.5	11	9.68 ± 1.14 b	20.06	49.68	38.19 ± 3.02 b	60	Branches and axes
		Closed	8	13.7	12.02 ± 1.01 b	22.4	48.8	36.27 ± 1.53 b	60	Branches and axes
	Old trees	Opened	18	31.7	25.22 ± 3.21 a	61.3	178.44	85.51 ± 6.12 a	60	Branches and axes
Closed		20.5	29.5	25.3 ± 3.32 a	60.1	115.61	76.98 ± 7.36 a	60	Branches and axes	
<i>P</i>			0.0001			0.0001				

Young trees = 1 to 5 years old, H (m) = 0.1 to 6 m and D or DBH (cm) = 1 to 19 cm; **Adult trees** = 6 to 20 years old, H (m) = 7 to 14 m and D or DBH (cm) = 20 to 50 cm; **Old trees** = ≥21 years old, H (m) = ≥15 m and D or DBH (cm) = ≥60 cm; **H** = height, **D** ou **DBH** = Tree diameter, **Min** = minimum, **Max** = Maximum, **Indiv Nber** = number of individuals observed, **GU** = growth units or modules.

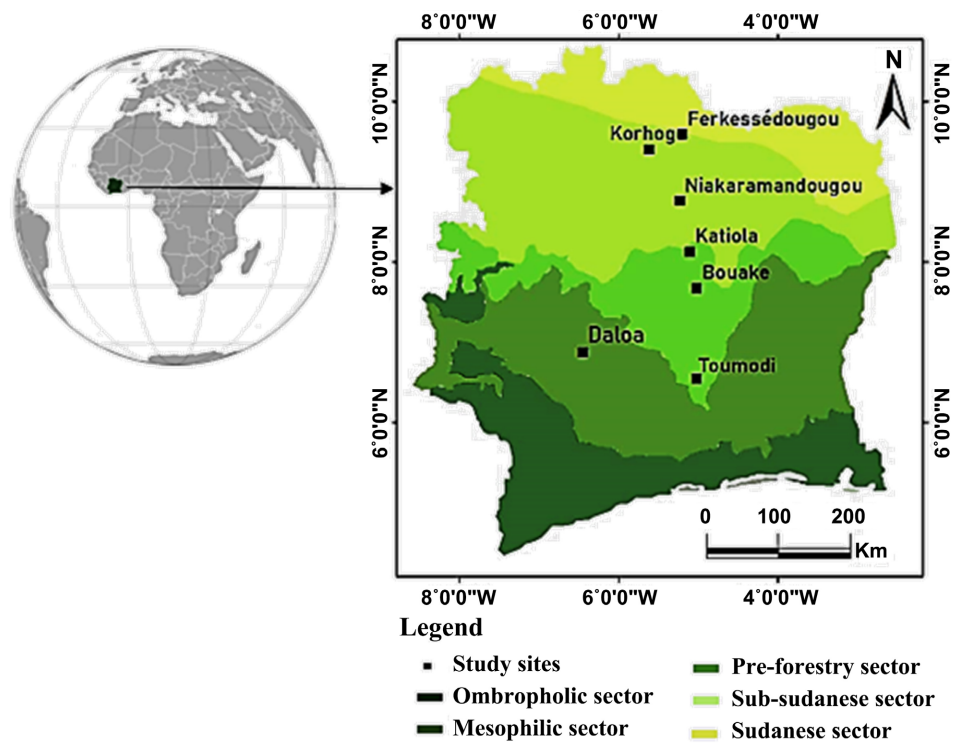


Figure 1. Geographical location of the study area.

were arbitrarily and randomly selected in open and closed areas in six localities mentioned above (Ferké, Korhogo, Niakara, Katiola, Bouaké and Toumodi). 15 individuals aged 1 year and 15 individuals aged 2 years resulting from the germination of seeds raised and monitored in the nursery were also selected in a locality outside the natural propagation area of origin of the species (Daloa): 15 trees + 15 trees = 30 trees. We therefore have: 390 trees (10 individuals × 2 areas

Table 2. Characteristics of surveyed localities [22].

Sites/ locations	GPS coordinates	Vegetation	Climate	Temperature (°C)	Rainfall (mm/year)	Soil type
Ferké	5°23'43.39644"W; 9°36'1.87056"N	Grassy and little wooded savannah	Dry tropical	27 - 40	263 - 1200	Ferrallitics soil (Ferrisols, Cambisols, Fluvisols, Luvisols), highly to moderately desaturated.
Korhogo	5°36'12.39612"W; 9°33'24.68988"N	Open forest (wooded savannah)	Dry tropical	26.6 - 35.7	817 - 1216	Ferruginous (90%) and Ferrallitic (10%): superficial gravelly soil, deep gravel with a heavy texture, low in organic matter, highly desaturated.
Niakara	5°18'40.73544"W; 8°40'47.97912"N	Wooded and grassy savannah	Dry tropical	24.7 - 38	800 - 1230	Complex of slightly desaturated ferrallitic soils and eutrophic brown tropical soils derived from basic rocks.
Katiola	5°7'35.814"W; 8°13'53.94"N	Wooded and grassy savannah	Dry tropical	24 - 36	1100 - 1200	Moderately and highly desaturated ferrallitic soils.
Bouaké	5°5'47.3289"W; 7°40'45.335"N	Clear forest (wooded savannah)	Wet tropical	23.6 - 34	1100 - 1200	Gravelly, moderately saturated, reworked, shallow ferrallitic gravel from a granitic alteration material with a sandy-clay texture.
Toumodi	5°1'34.95576"W; 6°22'42.67848"N	Open forest (wooded savannah, grassland and gallery forests)	Wet tropical	26.6 - 30	1092 - 1200	Ferrallitic soil on granitic bedrock (sandy-clayey soil), characterised by the weak differentiation and friable consistency of their horizons.
Daloa	6°26'9.19788"W; 6°54'32.058"N	Tropical rainforest	Wet tropical	21 - 34	1000 - 1900	Ferrallitic, deep, acidic and desaturated in exchangeable bases, rich in organic matter.

°C = Celsius degree, mm = millimeter, W = west, N = North.

(open or closed) × 6 localities × 3 stages + 30 in the nursery). All trees were in good physiological condition (free of trauma). The samples were classified according to the level of analysis. They were characterised by growth site, age of individuals, number of individuals or axes observed, type of axes measured in the tree. The stages (young, adult and old) were arbitrarily chosen on the basis of their dendrometric size (height and diameter) according to individuals raised in nurseries and those present in plots set up in the 1970s and 1980s by the Côte d'Ivoire National Agricultural Research Centre (CNRA).

2.3.2. Retrospective Analysis: Choice of Axis Type and Habitat

Observations were made on different types of axes depending on the accessibility of the crowns in two different habitats. For young trees, the axes assessed were the main trunks because of the easy access and the non-frequency of secondary branches on all individuals in this category. For mature and old trees, the axes assessed were only tertiary branches and short twigs due to accessibility. Assessments were carried out in situ for young trees; whereas, for mature and old

trees, branches were cut and transported to the laboratory for observations (**Figure 2**). Two types of environments were considered: undergrowth and full sun. The former refers to individuals living in a very shaded environment with a forest canopy or in an overcrowded environment with superior shelter. The latter refers to individuals isolated in full sun or in an open environment in direct contact with sunlight.

2.3.3. Architectural Analysis Method

Based on morphological concepts and criteria [10] [23] [24], architectural analysis [8] [17] consists of a global representation of the aerial branching system of individuals of various age and growing in various environments. This global representation is accompanied by a precise morphological description of some parts of the aerial branching system. This analysis makes it possible to identify the different categories of axes (trunk, branches, twigs, etc.) and to characterise them by a set of criteria (ability to branch, growth direction, flowering, etc.).

In order to identify these different characteristics of growth and branching modes, we started with a complete description of the aerial system of each individual, integrating the spatial arrangement and structure of the different axes constituting it by means of drawings and diagrams. We used the usual morphological markers of the functioning of the primary meristems, printed in the bark

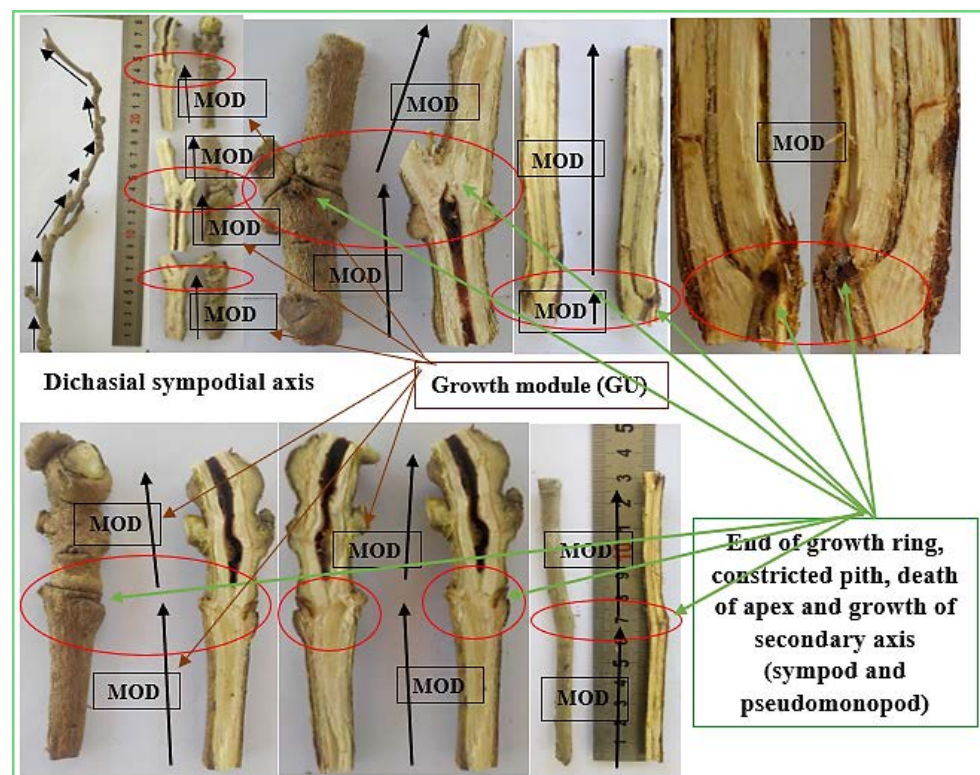


Figure 2. Images of fine morphological observations with retrospective analysis of growth units or modules in *Parkia biglobosa*. The labels or areas circled in red are the growth stops or trauma to meristem function and the limits of the growth modules (GU); the black labels named MOD are the lengths of the growth units or modules.

and anatomy of the different axes (**Figure 2**). We studied several individuals at various stages of development and in various environmental conditions, considering the organism at different scales from the level of organisation of the organ (node, internode and leaf) to that of the whole plant. We described the fundamental morphological and architectural characteristics of each of the standing plants with the naked eye and with binoculars for the larger ones by observation and drawings. The juxtaposition/comparison of these drawings/diagrams allowed us to characterise the architecture of the species and to reconstruct its development. More detailed morphological observations could be made by removing particular parts of trees after felling (**Figure 2**). First, we described younger individuals (seedling stage) up to older or taller, more complex individuals (structure with one or more branching order). The level of complexity was assessed by the maximum branching order of the aerial system. In the field, the individuals observed per stage depended on the structural variability expressed and the ability to generalise and synthesise the average architecture of the stage concerned. For the youngest and smallest individual we considered the whole plant and for larger individuals, we observed and drew the whole plant in situ and took parts of the plant for detailed observations in situ and in the laboratory. Notes specifying the scale, location of the plant and certain facts or events were marked on each drawing. The results were presented in the form of drawings characterising representative individuals at each stage of development, a set of diagrams revealing the developmental sequence of the species etc. Each diagram is a synthesis of the observations made and the results of the study. Each diagram is a synthesis of observations made on several individuals that have reached the same stage of development.

2.3.4. Parameters Assessed

To qualify (architectural analysis) and quantify (retrospective analysis) the axes in the architectural approach and to facilitate the drawings and subsequent description of the architectural characterisation, the following characteristics were used:

- Qualitative aspects: leafy axis (phyllotaxis*, internode), growth (definite*, indefinite*, monopodial* or sympodial*), direction and differentiation of axes (orthotropic* or plagiotropic*), growth (definite*, indefinite*, monopodial* or sympodial*, monocyclism, polycyclism), direction and differentiation of axes (orthotropic* or plagiotropic*, mixed*, ageotropic*), mode of branching (order of branching, immediate*, deferred*, delayed*; rhythmic*, continuous*, diffuse*, acrotone*, mesotone*, basitone*; epitone*, hypotone* and amphitone*), position of sexuality (terminal and lateral), life span of axes and leaves [5];
- Quantitative aspects: average length and diameter of growth units or modules (MODs), average number of phytomeres per MOD. These data were collected on the first two growth units or Modules from the tip (apex) of the shoots of the primary axes (young trees) and secondary and tertiary axes

(mature and old trees).

2.3.5. Statistical Data Analysis

Quantitative data were pooled and compared with each other (MANOVA) using SAS software version 9.4. The Student-Newman-Keuls test at the 5% threshold was used for post hoc comparisons. The links between the different quantitative parameters were made using XLSTAT 2020 version 7.5.

3. Results

Through this work, which required the observation of several individuals of all sizes (from seedlings to senescent trees) by means of synthetic drawings, the development by stage (young, adult and old) was established. The following analysis is the result of such a description. There are therefore 3 main stages during the ontogeny of the species, each defined by precise morphological characteristics. Firstly, we characterise the endogenous development of the young plant until senescence and then we analyse, if possible, certain variations, whether they are natural variations within homogeneous plantations or variations induced by the management of the stands (density of the forest cover) or the consequences of pedological or climatic events.

3.1. Young Stage

In *Parkia biglobosa*, the seedling consists of an unbranched stem with bipinnate compound leaves. The phyllotaxy is alternate spiral. At this stage the leaf bears 2 to 6 leaflets with one stipule at the base of the petiole (leaf sheath) and another stipule at the end of the primary rachis. Each leaflet bears 9 to 16 pairs of secondary leaflets and the secondary rachis bear a single secondary stipule inserted at the end of the secondary rachis. The young stem tends to zig-zag (right-left-right-left) in the direction of the weight of the established leaves. After the formation of a phytomere, the stem continues to grow in the opposite direction to the previous leaf. This causes the main stem to twist and gives the impression that the leaves are distributed in an alternating spiral fashion along the leaf stem, but in reality the phyllotaxy is alternating distichous.

After 3 to 4 months of evolution, the apical meristem dies by desiccation, the part below the dead part swells by bulging, giving a water tower shape to the phytomere. At this point, the initially monopodial growth mode becomes sympodial. In the forest, nodule-like swellings appear on the leaf rachis and the main stem at this stage. The nearest axillary bud takes over in the direction of the main stem and after 2 to 6 phytomeres, it dies in turn, and so on. This system forms clearly visible modules along the stem. In most cases there is only one relay shoot and the structure is a monochasial* sympod. The stem is usually curved at the distal end and later straightens as the stem expands and loses its leaves. In fact, as the stem grows in height, the old leaves (in the base) are pruned off by themselves and in succession. The stem retains only the new leaves of the new module in the apical part. These leaves are larger and heavier than the

phytomer, the module and often the stem; it is the weight of the leaves that causes the stem to collapse. After a year, when the main stem bends, the relay bud sets up in the bending part of the stem, the rest of the bent portion prunes and so on. The stem is a pseudomonopod* and the modules are clearly visible on the stem (growth arrest zones are marked by markers and well-swollen plateau-like areas).

The branching appears in the second year, the branches are short, deferred* and located in the middle of the tree. The branching is initially in a vertical direction and collapses, and then lengthens in the horizontal direction. It forms in the middle of most modules (mesotone*) and often at the end of the modules (acrotone*). The branching is not continuous, it does not follow any growth rhythm, it is diffuse* on the trunk. All the branches formed follow the same process of pruning the trunk and are all sympodes. This is the beginning of the establishment of the top. Observations on individuals of this stage revealed that the individuals cultivated and monitored in the nursery were larger and more vigorous than the wild individuals observed in the forest. The latter suffer more trauma (insect attacks) than those observed in nurseries.

Table 3 shows the comparison of the morphological parameters of the modules or GUs according to the habitat, the localities surveyed and according to the habitat per locality. The habitat does not statistically influence the morphology of the modules ($P > 0.05$). However, most of the morphological parameters vary from one locality to another ($P < 0.05$) and from one habitat to another per locality ($P < 0.05$).

3.2. Mature Tree and Flowering

The tree continues its development by setting up increasingly vigorous branches whose structure is a succession of amphitone* and hypotone* relay axes. At this stage, the tree still has a hierarchical structure around a single large trunk. The architectural unit is established at this stage after flowering with 3 categories of axes (**Table 4**) and 4 orders of branching. Surveys of rural populations revealed that the first flowering occurs between the 10th and 16th year after planting. Flowering is terminal and lateral in this species and occurs in the dry season. The flower buds grow longer and invade the whole tree. Flowering occurs only on the A4 (majority) and short branches (minority). The terminal inflorescence of the axes and trunk later leads to the production of successive forks (vigorous relays), one of which is established in the extension of the trunk (vertical) until a certain point. This direction then becomes oblique and then horizontal under the effect of gravity. When the tree reaches its maximum development, the contour of the crown is rounded and irregular; the periphery of this crown is composed of sympodial structures of almost identical size and morphology.

Table 4 shows the morphological and architectural description of the axis types constituting the architectural unit in *Parkia biglobosa*.

Table 5 presents the comparison of morphological parameters of modules or GUs according to habitat, surveyed localities and habitat by locality in adult

Table 3. Influence of habitat, locality and habitat by locality on the morphology of the first two modules in young trees of *Parkia biglobosa*.

Habitats/ Locality	Height (m)	Diam (cm)	MOD1-length (cm)	MOD1-diam (cm)	MOD1-leaf Nber	MOD2-length (cm)	MOD2-diam (cm)	MOD2-leaf Nber
Psol	1.95 ± 0.11 b	4.35 ± 0.24 b	18.53 ± 7.91 a	0.76 ± 0.43 a	10.47 ± 3.95 a	16.59 ± 4.59 a	1.13 ± 0.63 a	12.76 ± 3.85 a
Sbs	2.56 ± 0.05 a	7.06 ± 1.22 a	14.8 ± 7.06 a	0.88 ± 0.13 a	12.33 ± 4.5 a	19.52 ± 7.97 a	1.55 ± 0.55 a	15.17 ± 4.99 a
Pr > F	0.0064	0.0036	0.5069	0.5522	0.3340	0.4953	0.1523	0.2181
Bouaké	3.2 ± 7.89 ab	17.91 ± 8.43 b	29.65 ± 14.56 a	1.39 ± 0.34 a	15.28 ± 1.79 a	23.61 ± 9.4 a	2.04 ± 0.38 a	17.43 ± 3.45 a
Daloa	0.77 ± 0.11 b	1.41 ± 0.51 c	13.74 ± 8.27 a	0.43 ± 0.07 b	7 ± 2.06 b	15.98 ± 7.84 a	0.6 ± 0.09 c	9.78 ± 2.16 a
Katiola	3.72 ± 5.68 ab	11.09 ± 6.64 bc	12.95 ± 8.47 a	0.79 ± 0.25 b	11.5 ± 2.73 ab	13.95 ± 3.47 a	1.37 ± 0.28 b	14.5 ± 3.08 a
Korhogo	0.95 ± 3.32 b	11.06 ± 7.81 bc	9.8 ± 2.12 a	0.53 ± 0.03 b	13 ± 5.66 ab	18.5 ± 5.6 a	1.06 ± 0.47 bc	13.5 ± 3.53 a
Niakara	5.6 ± 1.41 a	17.98 ± 12.4 a	15.7 ± 3.8 a	0.73 ± 0.1 b	12 ± 4.4 ab	6.7 ± 2.3 a	0.81 ± 0.21 bc	14 ± 3.4 a
Toumodi	0.79 ± 1.28 b	6.14 ± 3.08 bc	16.85 ± 7.7 a	0.54 ± 0.17 b	8.5 ± 3.53 ab	14.5 ± 6.5 a	1.14 ± 0.37 bc	10.5 ± 4.94 a
Ferké	1.19 ± 1.3 b	5.74 ± 1.21 bc	11.45 ± 2.7 a	0.64 ± 0.21 b	9.6 ± 2.33 ab	16.1 ± 7.5 a	0.84 ± 0.6 bc	15.4 ± 6.64 a
Pr > F	0.0045	0.0001	0.0533	0.0001	0.0001	0.3127	0.0001	0.0621
Psol-Bouaké	3.05 ± 5.79 ab	10.71 ± 11.36 ab	36.57 ± 16.28 a	1.5 ± 0.18 a	14.75 ± 1.7 ab	22.85 ± 6.19 a	2.12 ± 0.39 a	16.25 ± 3.5 a
Psol-Daloa	0.67 ± 0.11 b	1.41 ± 0.51 b	13.74 ± 8.27 b	0.43 ± 0.07 b	7 ± 2.06 b	15.98 ± 7.84 a	0.6 ± 0.09 b	9.77 ± 0.16 ab
Psol-Katiola	3.84 ± 4.82 ab	9.57 ± 6.15 ab	14.58 ± 8.34 b	0.84 ± 0.26 b	11.6 ± 3.05 ab	14.12 ± 7.58 a	1.36 ± 0.31 b	15.6 ± 1.67 a
Psol-Korhogo	3.3 ± 2.3 ab	11.59 ± 7.41 ab	8.3 ± 2.31 b	0.53 ± 0.21 b	17 ± 4.3 a	26 ± 6.63 a	1.4 ± 0.61 b	16 ± 3.33 a
Psol-Niakara	5.5 ± 6.31 a	17.98 ± 11.4 a	15.7 ± 1.7 b	0.73 ± 0.04 b	12 ± 3.4 ab	6.7 ± 1.73 a	0.81 ± 0.11 b	14 ± 2.36 a
Psol-Toumodi	1.48 ± 0.13 b	2.96 ± 1.31 b	22.3 ± 6.3 ab	0.66 ± 0.13 b	11 ± 3.4 ab	9.9 ± 0.83 a	0.88 ± 0.23 b	7 ± 1.7 b
Pr > F	0.0133	0.0001	0.0378	0.0001	0.0005	0.3566	0.0001	0.0009
Sbs-Bouaké	4.4 ± 2.27 a	15.5 ± 2.1 a	20.43 ± 3.92 a	1.26 ± 0.51 a	16 ± 2 a	24.63 ± 13.31 a	1.93 ± 0.41 a	19 ± 3.46 a
Sbs-Katiola	3.9 ± 7.3 a	16.69 ± 7.33 a	4.8 ± 1.33 b	0.6 ± 0.13 a	11 ± 3.4 a	13.1 ± 3.4 b	1.4 ± 0.31 a	9 ± 2.3 b
Sbs-Korhogo	4.6 ± 1.7 a	5.54 ± 1.83 b	11.3 ± 3.41 ab	0.53 ± 0.11 a	9 ± 2.51 a	11 ± 3.31 b	0.73 ± 0.23 a	11 ± 3.61 b
Sbs-Toumodi	4.3 ± 0.77 a	7.32 ± 3.1 b	11.4 ± 2.6 ab	0.41 ± 0.07 a	6 ± 1.81 a	19.1 ± 3.36 a	1.4 ± 0.2 a	14 ± 3.4 ab
Pr > F	0.0697	0.0086	0.0091	0.5020	0.1161	0.0014	0.3248	0.004

Values with the same letters are not statistically different at the 5% level. **Psol** = open and sunny environment, **Sbs** = crowded or forested environment, **Height (m)** = tree height in metres, **Diam (cm)** = diameter at the base of the tree in centimetres, **MOD** = Module or Growth Unit, **MOD1-length (cm)** = length of the first module or growth unit in centimetres, **MOD1-diam (cm)** = diameter at the base of the first module or growth unit in centimetres, **MOD1-leaf Nber** = number of leaves or phytomers carried by the first module or growth unit, **MOD2-length (cm)**, **MOD2-diam (cm)**, **MOD2-leaf Nber** = Parameters of the second growth unit or Modules. **MOD1** are the growth units or modules located at the shoot tip (apex or summit of the sampled axis); **MOD2** are the growth units or modules that directly follow **MOD1**.

Table 4. Summary table of the characteristics of the architectural unit in *Parkia biglobosa*.

	Trunk or main stem	Branche	Twigs
Phyllotaxy	Alternate spiral to distichous (axial and bilateral symmetry)	Alternate spiral to distichous with twisting of the leaf axis giving a spiral leaf appearance (axial and bilateral symmetry)	Alternate spiral to distichous with torsion of the module giving a spiral leaf appearance (axial and bilateral symmetry)

Continued

Leaves type NB: In the wild, nodosities (swellings) are common on the petiole and rachis of leaves	Paripinnate compounds with one stipule per leaf sheath and another stipule at the end of the primary rachis. The leaves are composed of 2 to 16 pairs of leaflets on the compound leaf and 11 to 52 pairs of secondary leaflets on each leaflet.	Paripinnate compounds with one stipule per leaf sheath and another stipule at the end of the primary rachis. The leaves are composed of 2 to 16 pairs of leaflets on the compound leaf and 11 to 52 pairs of secondary leaflets on each leaflet.	Paripinnate compounds with one stipule per leaf sheath and another stipule at the end of the primary rachis. The leaves are composed of 2 to 16 pairs of leaflets on the compound leaf and 11 to 52 pairs of secondary leaflets on each leaflet.
Growing	Determinate (defined)	Determinate (defined)	Determinate (defined)
Preferential growth direction	Vertical in the proximal part and oblique to horizontal in its distal part	Oblique (minority) and horizontal (majority)	Horizontal
Ramification	Mesotone (majority) and Acrotone (minority) on growth modules	Mesotone (majority) and Acrotone (minority) on growth modules	No
Size of growth units (GUs)	Variable: 4.5 to 35.5 leaf scars; Long and short in places (3.85 to 51.4 cm)	Variability: 4 to 27 leaf scars; Long and short in places (4.5 to 43.6 cm)	Variability: 3 to 16 leaves; Short and very short in places (2.1 to 11 cm)
Annual shoots	Polycyclic (2-5 GU)	Polycyclic (2 - 4 GU)	Polycyclic (2 - 3 GU)
Sexuality	-	Terminal and lateral in the dry season	Terminal and lateral in the dry season
Leaf caducity	Dry season flowering period (January, February and March)	Dry season flowering period (January, February and March)	Dry season flowering period (January, February and March)
Taper of the axis	Height: 0.64 m to 31.7 m Diameter: 2.8 cm to 178.44 cm	Height: 0.26 m to 9.5 m Diameter: 1.4 cm to 23.2 cm	Height: 0.08 m to 0.67 m Diameter: 0.7 cm to 4.4 cm
Axis complexity	Bears branching orders 2, 3 and short, greedy twigs	Bears only branching orders 3 and short gourmand branches	No (unbranched), but bears flowering clusters and shoots

Table 5. Influence of habitat, locality and habitat by locality on the morphology of the first two modules in adult *Parkia biglobosa* trees.

Habitats/ Locality	Height (m)	Diam (cm)	MOD1-length (cm)	MOD1-diam (cm)	MOD1-leaf Nber	MOD2-length (cm)	MOD2-diam (cm)	MOD2-leaf Nber
Psol	9.68 ± 1.14 a	38.15 ± 3.02 a	15.63 ± 5.15 a	0.76 ± 0.31 a	11.47 ± 5.97 a	16.15 ± 12.81 a	1.13 ± 0.58 a	14.14 ± 6.74 a
Sbs	12.02 ± 1.01 a	36.27 ± 1.53 a	14.25 ± 6.55 a	0.75 ± 0.11 a	10.89 ± 4.83 a	16.93 ± 7.98 a	1.23 ± 0.38 a	16.55 ± 5.63 a
Pr > F	0.9971	0.4114	0.7956	0.9479	0.7968	0.8675	0.6768	0.3558
Bouaké	9.66 ± 3.45 b	44.94 ± 7.56 a	14.6 ± 3.02 a	1.01 ± 0.25 a	11 ± 2 a	21.36 ± 12.99 a	1.8 ± 0.26 a	19 ± 4.58 a
Ferké	9.23 ± 5.47 b	39.39 ± 5.47 a	26.94 ± 12.47 a	1.06 ± 0.53 a	15.57 ± 7.41 a	15.62 ± 6.68 a	1.49 ± 0.77 a	13.57 ± 7.02 a
Katiola	13.1 ± 7.33 a	28.57 ± 8.6 b	7.8 ± 0.74 a	0.71 ± 0.1 a	8 ± 2.41 a	18.3 ± 7.4 a	1.7 ± 0.73 a	19 ± 5.4 a
Korhogo	10.77 ± 6.5 b	33.54 ± 15 b	10.95 ± 2.12 a	0.59 ± 0.12 a	10.87 ± 2.07 a	12.38 ± 3.56 a	0.81 ± 0.15 a	10.63 ± 2.65 a
Niakara	9.2 ± 8.29 b	35.09 ± 5.78 b	11.16 ± 3.47 a	0.69 ± 0.14 a	8.4 ± 2.08 a	15.14 ± 3.49 a	0.89 ± 0.08 a	15.6 ± 1.81 a
Toumodi	8.03 ± 3.73 b	21.28 ± 5.95 c	12.15 ± 4.48 a	0.57 ± 0.19 a	10 ± 2.96 a	20.83 ± 3.12 a	1.07 ± 0.24 a	18.66 ± 5.31 a
Pr > F	0.0001	0.0001	0.1695	0.0596	0.2962	0.7971	0.0582	0.1745
Psol-Bouaké	8.7 ± 1.83 b	45.92 ± 11.43 a	17 ± 1.83 a	1.3 ± 0.41 a	11 ± 2.41 a	32.3 ± 7.31 a	2.1 ± 0.13 a	23 ± 5.4 a

Continued

Psol-Ferké	12.3 ± 5.56 a	41.01 ± 5.89 ab	27.03 ± 10.05 a	1.11 ± 0.22 a	15.16 ± 3.28 a	15.4 ± 7.9 a	1.61 ± 0.31 ab	12.83 ± 3.01 a
Psol-Korhogo	8.68 ± 7.42 b	38.9 ± 15.64 b	9.8 ± 4.34 a	0.56 ± 0.12 b	10.33 ± 2.23 a	13.98 ± 4.65 a	0.79 ± 0.07 b	11.33 ± 3.55 a
Psol-Niakara	12.25 ± 2.65 a	45.54 ± 3.28 a	11.02 ± 4.48 a	0.64 ± 0.04 b	8.75 ± 2.65 a	14.32 ± 8.76 a	0.81 ± 0.11 b	15.75 ± 2.06 a
Psol-Toumodi	7.62 ± 1.66 b	21.1 ± 0.85 c	11.55 ± 2.71 a	0.52 ± 0.11 b	10.5 ± 1.65 a	18.32 ± 4.13 a	1.02 ± 0.11 b	16.5 ± 2.53 a
Pr > F	0.0066	0.0006	0.3060	0.0331	0.5219	0.7787	0.0167	0.4820
Sbs-Bouaké	9.65 ± 0.49 a	44.45 ± 10.62 a	13.4 ± 3.11 b	0.87 ± 0.05 a	11 ± 2.82 a	15.9 ± 8.9 a	1.65 ± 0.05 a	17 ± 3 a
Sbs-Ferké	10.6 ± 1.47 a	43.68 ± 11.4 a	26.4 ± 1.37 a	0.73 ± 0.11 a	18 ± 1.73 a	17 ± 2.43 a	0.78 ± 0.14 a	18 ± 4.1 a
Sbs-Katiola	9.1 ± 6.4 a	42.57 ± 7.4 a	7.8 ± 1.28 c	0.71 ± 0.04 a	8 ± 2.4 a	18.3 ± 7.1 a	1.7 ± 0.13 a	19 ± 2.7 a
Sbs-Korhogo	9.05 ± 2.05 a	38.44 ± 12.01 a	14.42 ± 7.97 b	0.69 ± 0.07 a	12.5 ± 6.5 a	7.6 ± 0.2 a	0.86 ± 0.03 a	8.5 ± 1.5 a
Sbs-Niakara	10 ± 3.4 a	43.31 ± 13.1 a	11.7 ± 1.43 b	0.91 ± 0.14 a	7 ± 2.4 a	18.4 ± 1.48 a	1.2 ± 0.13 a	15 ± 6.1 a
Sbs-Toumodi	12.85 ± 4.15 a	45.64 ± 7.48 a	13.35 ± 1.95 b	0.66 ± 0.03 a	9 ± 2.82 a	25.85 ± 3.46 a	1.18 ± 0.35 a	23 ± 2.82 a
Pr > F	0.0702	0.3151	0.0039	0.1959	0.7584	0.4713	0.1132	0.1262

Values with the same letters are not statistically different at the 5% level.

trees. According to the table, habitat and surveyed localities did not significantly influence the majority of the morphological parameters of the assessed modules ($P > 0.05$).

3.3. Older Scene

In old and aged trees, all twigs tend to droop. New sympodial twigs develop from dormant buds by piling up in the bending zones in amphitone* and epitone* positions. These structures are in fact successive partial reiterations. The total reiterations occur later, giving the impression of rescuing the tree in distress. These new reiterations regenerate the top of the tree, while the old structures fall off the tree (the tree molts). The whole tree becomes a reiterated complex; in the periphery of the crown, the sympodial structures form successive arches (piling up). At this stage, the tree can carry up to 6 orders of branching with always three types of axis categories. The branching orders are the capacity to carry an axis (carrier-to-carrier ratio), while the axis category is a set of axes groupable by common botanical entity characteristics (size, diameter, number of GUs, phytomeres, flower buds, etc.). The tree can branch up to 6 times in order, but the axis categories are repeated in the successive branching at this stage. During flowering, the reiterations also bear terminal and lateral inflorescences. Flowering takes over the whole tree at this time; the outline of the crown is rounded but irregular.

Table 6 presents the analysis of variance of the morphological parameters of the modules by habitat and by locality in the sampled old trees of *Parkia biglobosa*. The former moduli were not influenced by the different localities surveyed in old trees ($P > 0.05$). However, they were influenced by habitat type ($P < 0.05$). Habitat (undergrowth and full sun) altered the morphology of the growth units at the shoot tips. However, the morphology of the growth units was statistically similar in all surveyed localities (**Table 6**).

Table 6. Influence of environment and locality on the morphology of growth units or modulus in old trees of *Parkia biglobosa*.

Habitats/ Locality	Height (m)	Diam (cm)	MOD1-length (cm)	MOD1-diam (cm)	MOD1-leaf Nber	MOD2-length (cm)	MOD2-diam (cm)	MOD2-leaf Nber
Psol	25.22 ± 3.21 a	85.51 ± 6.12 a	8.94 ± 1.42 a	0.64 ± 0.05 b	8.62 ± 0.7 b	13.76 ± 2.79 a	1.11 ± 0.11 a	14.12 ± 1.6 a
Sbs	25.3 ± 3.32 a	76.58 ± 7.36 a	15.46 ± 8.28 b	0.94 ± 0.09 a	12.4 ± 2.3 a	13.22 ± 5.81 a	1.53 ± 0.38 a	16.8 ± 6.26 a
Pr > F	0.454	0.3359	0.003	0.0098	0.0095	0.8974	0.0611	0.3894
Bouaké	21.7 ± 7.4 a	115.6 ± 11.4 a	6.4 ± 0.13 a	0.53 ± 0.08 a	8 ± 1.4 a	13.4 ± 2.4 ab	1.2 ± 0.04 ab	16 ± 3.4 ab
Ferké	27.5 ± 17.85 a	112.25 ± 36.73 a	12.67 ± 5.9 a	0.87 ± 0.27 a	11.25 ± 1.25 a	7.65 ± 2.14 b	1.4 ± 0.16 ab	11.25 ± 2.36 b
Korhogo	28.61 ± 2.81 a	69.04 ± 5.21 b	10.72 ± 1.70 a	0.58 ± 0.03 a	11.3 ± 1.76 a	14.61 ± 3.13 ab	0.86 ± 0.07 b	11.2 ± 2.16 b
Katiola	22.1 ± 11.23 a	76.48 ± 19.03 b	10.8 ± 3.37 a	0.88 ± 0.12 a	11 ± 0.58 a	16.46 ± 2.64 ab	1.77 ± 0.08 a	15.33 ± 1.45 ab
Niakara	26.2 ± 1.63 a	87.16 ± 3.91 ab	11.97 ± 5.08 a	0.64 ± 0.07 a	9.75 ± 2.17 a	14.55 ± 3.92 ab	0.8 ± 0.06 b	18.25 ± 3.98 a
Toumodi	23 ± 7.4 a	73.24 ± 8.4 b	11.4 ± 1.41 a	0.63 ± 0.13 a	6 ± 0.83 a	24.6 ± 3.4 a	1.23 ± 0.04 ab	17 ± 5.1 a
Pr > F	0.3009	0.0098	0.9627	0.3962	0.4943	0.0079	0.003	0.008

Values with the same letters are not statistically different at the 5% level.

3.4. Relationship between the Morphology Parameters of Modules Present on *Parkia biglobosa* Axes Observed

The analysis of the links between the morphological parameters of the modules evaluated (Table 7), indicates strong positive correlations between the lengths and diameters of module 1 ($r = 0.6986$), between the lengths and the numbers of leaves of module 1 ($r = 0.6375$) and between the diameters of modules 1 and 2 ($r = 0.7156$).

The relationships between the full-sun environment and the undergrowth environment in relation to the morphological parameters of the modules evaluated on the axes of the individuals are presented globally in Figure 3. This figure indicates very weak relationships ($R^2 = 0.028$; $r = 0.167$) between the lengths of the modules observed in full sun and those observed in undergrowth; then equally weak relationships ($R^2 = 0.078$; $r = 0.279$) between the numbers of leaves inserted on the modules of the axes evaluated in full sun and undergrowth. Although 57.19% of the diameters of the modules observed in full sun are related and 32.71% are explained by those observed in undergrowth (Figure 3(b)), the relationships remain weak and cannot be taken into account. The allometric equations of the models are:

- $Leng-MOD-psol = 13.91 + 0.21 * Leng-MOD-sbs$ ($Leng-MOD-psol$ = Length of modules or growth units in the full sun environment and $Leng-MOD-sbs$ = Length of modules or growth units in the undergrowth environment);
- $Diam-MOD-psol = 0.31 + 0.66 * Diam-MOD-sbs$ ($Diam-MOD-psol$ = Diameter of modules or growth units in the full sun environment and $Diam-MOD-sbs$ = Diameter of modules or growth units in the undergrowth environment);
- $Nber-leaf-MOD-psol = 10.08 + 0.31 * Nber-leaf-MOD-sbs$ ($Nber-leaf-MOD-psol$ = Number of leaves carried by the modules or growth units of the full sun environment and $Nber-leaf-MOD-sbs$ = Number of leaves carried by the modules or growth units of the undergrowth environment).

Table 7. Correlation matrix (Pearson (n)).

Variables	MOD1-lenght	MOD1-diam	MOD1-leaf Nber	MOD2-lenght	MOD2-diam	MOD2-leaf Nber
MOD1-lenght	1					
MOD1-diam	0.6986	1				
MOD1-leaf Nber	0.6375	0.4968	1			
MOD2-lenght	0.0893	0.2184	-0.0071	1		
MOD2-diam	0.2690	0.7156	0.2327	0.4972	1	
MOD2-leaf Nber	0.3046	0.2840	0.2040	0.5418	0.2824	1

Values in bold are different from 0 at significance level $\alpha = 0.05$.

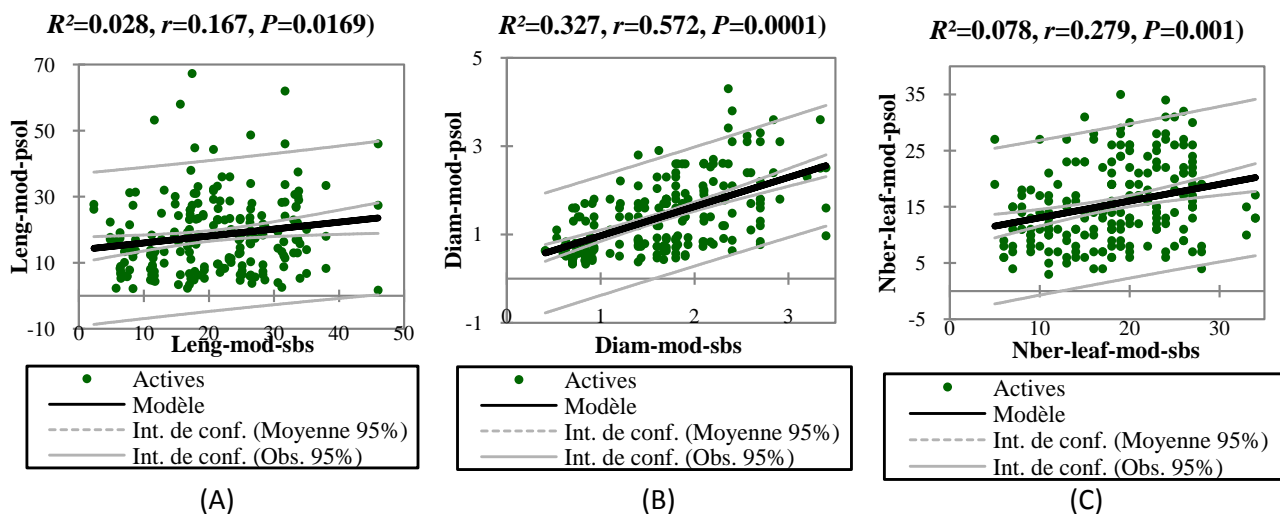


Figure 3. regressions between module lengths observed in full sun and undergrowth (A), between module diameters observed in full sun and undergrowth (B) and between the number of leaves carried by modules in full sun and undergrowth (C).

Figure 4 shows the correlations between the different module morphology parameters. Despite the significance of the parameters, the low correlation coefficients (R^2 and $r < 0.8$) indicate negligible links in the set between the evaluated parameters. The equations of the models are as follows:

- $Leng-MOD = 8.7 + 6.91 * Diam-MOD$ ($Leng-MOD$ = Length of modules or growth units and $Diam-MOD$ = Module or growth unit diameter);
- $Leng-MOD = 2.97 + 0.98 * Nber-leaf-MOD$ ($Nber-leaf-MOD$ = Number of leaves on modules or growth units) and
- $Nber-leaf-MOD = 7.12 + 6.14 * Diam-MOD$

Parkia biglobosa is a tree identical to Champagnat's model at the young tree stage (plant with a mixed vegetative axis, the main stem is orthotropic in its proximal part and plagiotropic "sags" in its distal part). The tree then transits to the Troll model at the adult and old stage (plant with a plagiotropic axis in the proximal and distal parts, the trunk is built by superimposing collapsed relay axes that gradually straighten, sympodial branching, amphitone* and epitone*, definite growth, terminal and lateral sexuality). Its structure is set up in three

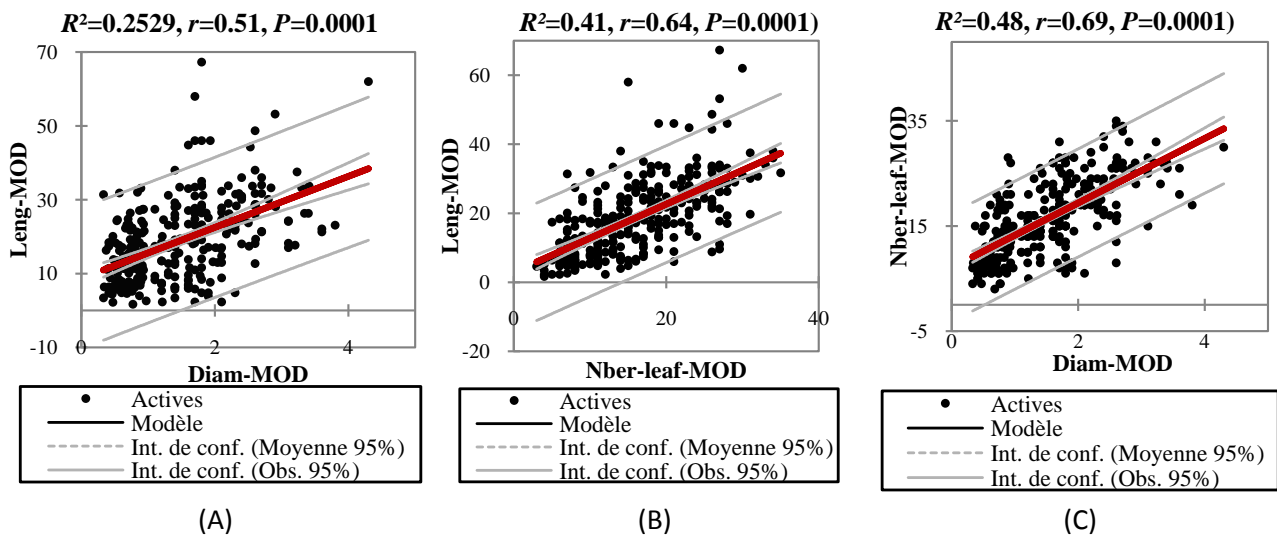


Figure 4. Representation of the relationships between module length and diameter (A), module length and leaf number (B) and leaf number and module diameter (C) in *Parkia biglobosa*.

phases: initiation of development and establishment of the top, then establishment of the architectural unit and finally duplication of the architecture by a series of partial and total reiterations. The level of organisation is 5: the phytomere, the module or growth unit, the axis, the architectural unit and the reiterated complex. **Table 8** shows the main architectural characters in *Parkia biglobosa*.

Figure 5 shows some drawings and diagrams summarising the architectural development in *Parkia biglobosa*.

4. Discussion

Each plant follows a succession of morphological development stages throughout its life with a precise sequence ordered by different elementary entities (composition of the tree axis structure): phytomere, growth unit [5] [12] [25]. This scientific discipline has several advantages: it allows us to understand the functioning and shape of plants, to describe the biological phenomena that gave rise to them and to translate the non-linear aspect of their reaction dynamics to certain stresses [7]. In this study, the architectural analysis carried out on *Parkia biglobosa* along a climatic gradient made it possible to highlight its architectural characteristics. The analysis of the morphology of the modules informed us about the adaptability and the evolution of the species in relation to a changing environment. These results are an introduction to the architectural study of this species, in order to open up short, medium and long-term research perspectives.

4.1. Architectural Analysis

In *Parkia biglobosa*, from the young stage, the leaves are already bipinnate and do not differentiate. Modules are formed in the very young stage by the death of the apex (trauma), which forms a monochasial sympod*. The boundaries of the

modules are well marked by bulging areas on the main stem and the young tree forms a collapsed pseudomonopod in the apical part under the weight of the leafy cap of the terminal modules. In the young stage the species adopts the Champagnat

Table 8. Architectural characteristics of *Parkia biglobosa* species.

1) Growth mode

- Defined
- Colonial, rhythmic
- Sympodial (mono, di and polychasial and modulated)
- Organ preformation

2) Branching mode

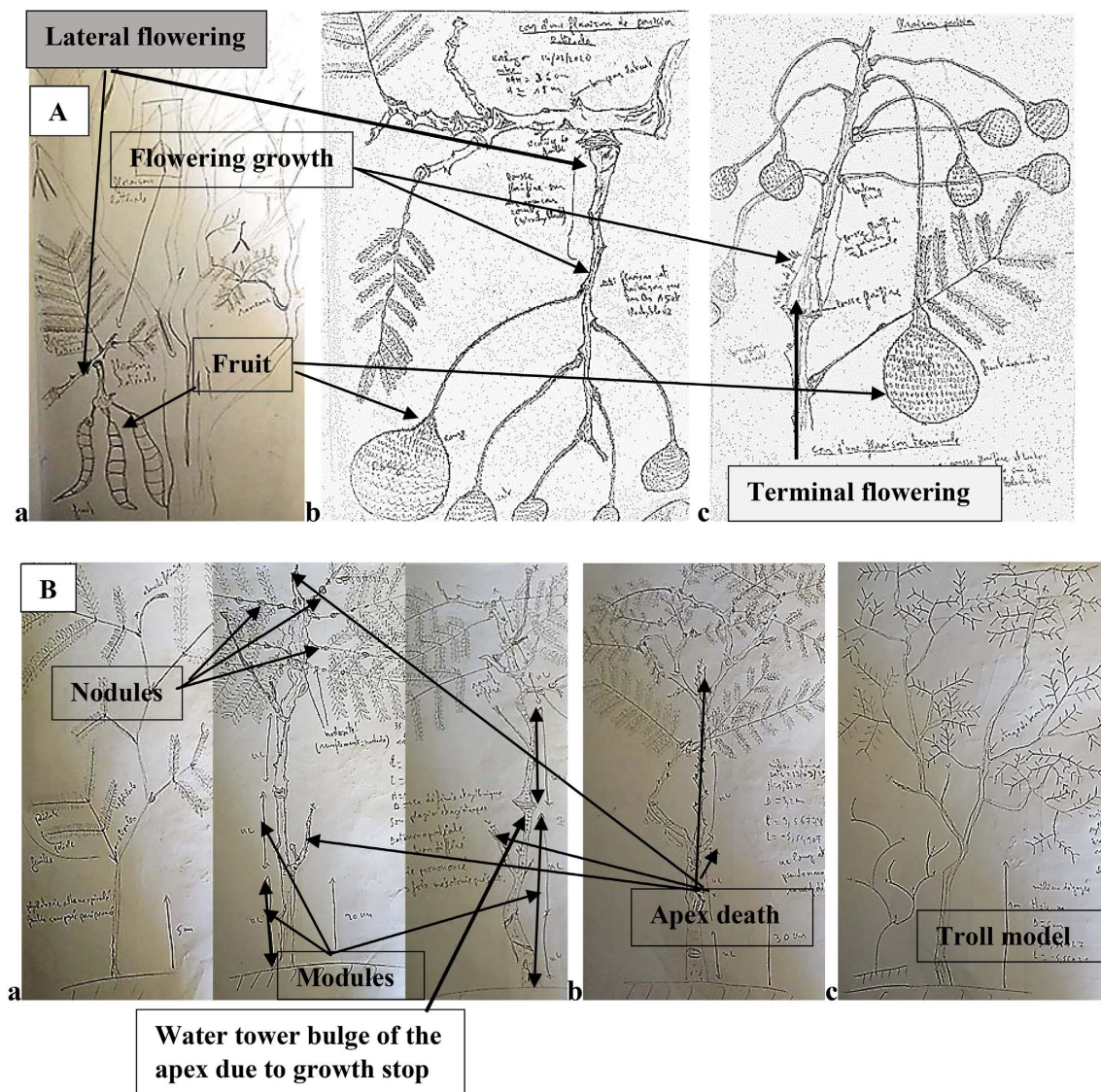
- Terminal and median (acrotone and mesotone on modules)
- Rhythmic
- Delayed or proleptic (without hypopodium, the terminal meristem dies, the relay bud(s) are delayed)

3) Differentiation of axes

- Rapid slowing of meristematic activity and death of the terminal bud in the short term
- Orthotropic-like trunk (pseudomonopod)
- Most axes (branches) are plagiotropic and ageotropic

4) Sexuality position

- Terminal and lateral (synchronised)



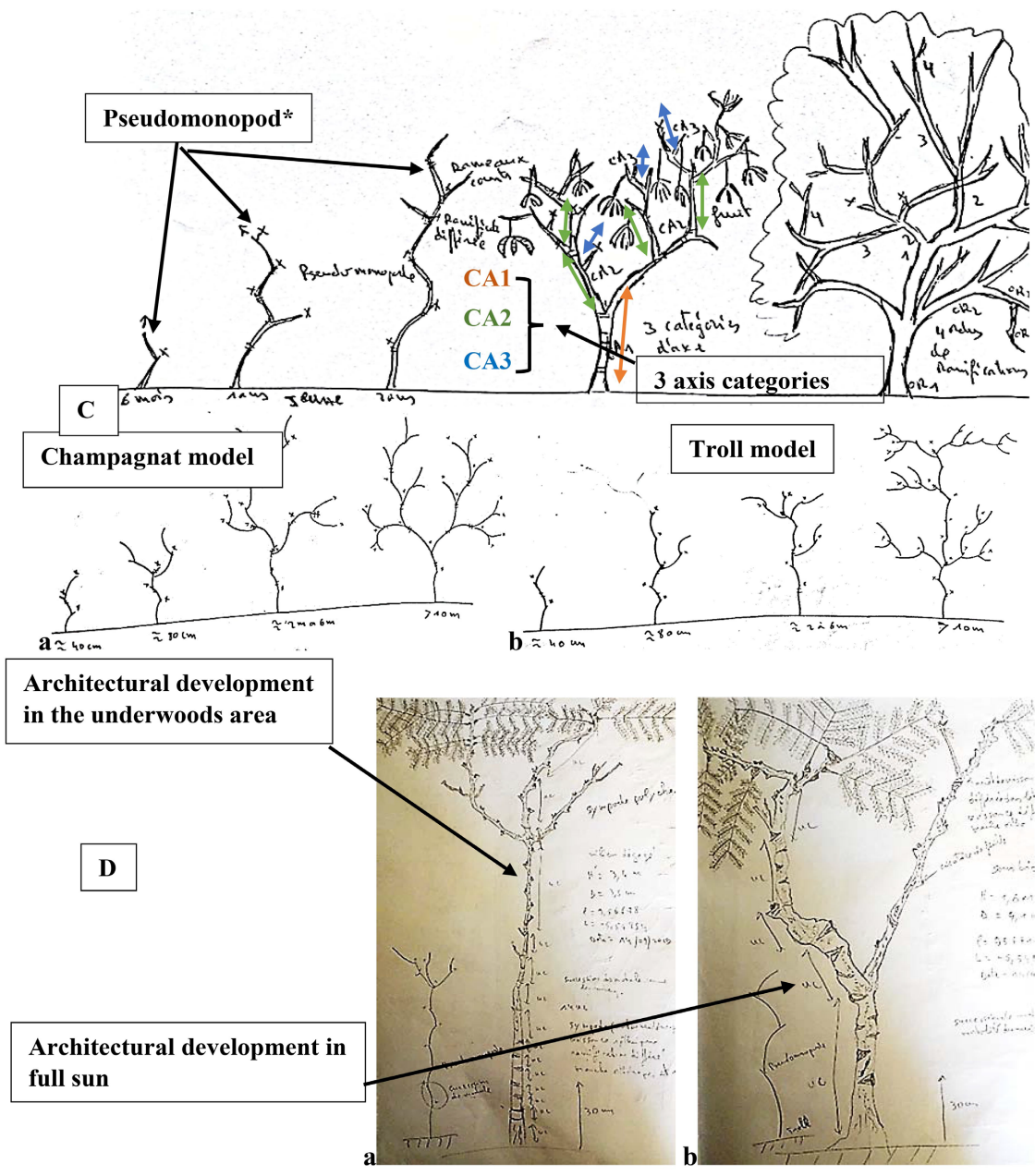


Figure 5. drawings and diagrams relating to types of flowering (A), a and b: lateral flowering, c: terminal flowering; traumatic phenomena often encountered (B), a: drawing of young plants with nodosities on the rachis of leaves in the understory and length of growth units or modules, b: trauma of the apical meristem leading to the death of the bud and the establishment of growth modules, c: drawing and diagram of an adult individual developing according to Troll’s model; the sequence of architectural development from seedling to senescent tree (C), a: development according to Champagnat’s architectural model and b: architectural development according to Troll’s model; the influence of habitat on architectural development (D), a: architectural development in a closed or covered environment and b: in an open or sunny environment.

architectural model and transits to the Troll model in the adult and old stage after flowering. In fact, in the young stage, the stem is built as a repetitive stack of unbranched and discretely branched axes (short branches on the stem). The main axis is vertical at the base with the distal (younger) end curved at a large

radius and brought back to the horizontal (collapsed) often to the ground due to gravity and the flexibility of the wood. The growth of the distal tips retains the vertical tendency and the leaves are spirally inserted with terminal and lateral flowering. The plant bears up to 6 orders of branching grouped into 3 categories of axes. This is the result of an intensive reiterative complex at the old stage. The architectural unit appears in the adult stage after flowering. According to [4], Champagnat's pattern is not known in ferns, Gymnosperms and Monocotyledons. This pattern appears in more than 30 families in the Dicotyledons. In the adult and old stage, the leafy axes overlap indefinitely in a horizontal fashion and secondary growth straightens the base vertically (pseudomonopod). The sympodial structures that form by superposition often go in all directions by piling up. This species is colonial and dominates its environment. The Troll model is not represented in ferns, Gymnosperms or Monocotyledons. However, more than 50 families of Dicotyledons are concerned by this model and the species of the three families of Leguminosae are built mainly, but not exclusively, according to the Troll model [4].

Architectural analysis has been undertaken mostly on temperate and South American species and has proven to be highly effective and successful in managing plant genetic resources in these areas [3] [7] [26]. This is the case of *Laetia procera* and *Dicorynia guianensis* [2]; *Juglans regia* and *Juglans nigra* [12]; *Fraxinus excelsior*, *Populus alba*, *Prunus padus*, *Quercus robur*, *Tilia cordata*, *Ulmus laevis*, *Cornus sanguinea*, *Corylus avellana*, *Prunus spinosa*, *Crataegus monogyna*, *Euonymus europaeus*, *Sambucus nigra*, *Viburnum opulus* [16]; *Fagus sylvatica* [1], etc.

Generally, architectural analysis on each individual is most frequently used because of its effectiveness in clearly illustrating the developmental pattern of a species. However, it is possible to analyse the three-dimensional organisation of a forest in a global way based on dendrometric data and graphical representations of plant architecture [16]. This makes it possible to develop the general architectural model of a forest [27] in order to identify the interest in forest interpretation and management or to illustrate the interest of the architectural model in the interpretation of biodiversity [16]. Indeed, the criteria used to characterise the architectural state of a plant are not always relevant and applicable to other species. It is therefore necessary to develop architectural approaches by grouping species by first studying the development sequence of key species under various stresses and behaviours in order to generalise or attribute it to a vegetation [2]. This mechanism would provide a global architectural vision of a forest for its rapid management.

Plant architecture holds many keys to understanding the ecological performance of species because resources (water, light, nutrients) are spatially variable and disturbances (e.g. frost, fire and herbivory) also impact on plants [3] [28] [29]. The main drivers of the evolution of architectural traits probably include water stress in deserts. Plant architecture strongly influences ecological performance and its role in plant evolution has recently been studied in depth by [30]

on the genus *Euphorbia*. The reason for their study was that plant architecture in relation to environmental and biotic variables was until now poorly understood. They therefore tested both phylogenetic and environmental signals to separate architectural traits into four categories. Their study showed that architectural traits explain the structural evolution of species and that this evolution is influenced by climatic constraints.

4.2. Growth Units or Modules Morphology

Parkia biglobosa is a light species and native to arid areas (savannah). However, it is shade tolerant, as the results of this study revealed that individuals observed in the nursery were taller and more vigorous than young wild individuals observed in the forest. This may be due to trauma from insect and herbivore attacks in the forest than in the nursery. Furthermore, analysis of variance showed that in young trees, the largest individuals were found in the undergrowth for all surveyed localities. This is due to the search for light; the stems elongate by means of intense apical meristematic activity induced by auxin (phytohormone) in order to reach the canopy. The majority of these trees develop fewer branches and have a tapered monopodial trunk. The majority of these trees benefit from a humid environment due to evapotranspiration of leaves from trees with higher strata. In contrast to the young wild trees, which are exposed to full sun and have less of a microclimate that is favourable to their functioning (drier soil and environment). The latter are short and very often develop reiterations that are confused with branches. Their height is smaller because the race for light is not necessary and urgent in addition to the lack of water (dry soil). The effects of light and environment on development and growth have been demonstrated in several studies [31] [32] [33] [34] [35]. The results showed that the two environments considered (undergrowth and full sun) had no influence on the morphology of the growth units in young trees. Regardless of the environment, meristem function may depend on the plant genome and therefore cannot be significantly influenced by the environment in many cases. The expressed phenotype is therefore purely related to the plant genotype. Indeed, according to [4], the genetic programme for plant growth and development, of which the architecture is the visible expression, may not vary from one environment to another in several families of species. Locality has had influences on the morphology of growth units in young trees. This is due to the difference in climate, soil type and rainfall between localities. Indeed, observations on the morphology of growth units were made along a south-north drought gradient. It is obvious that some localities have more severe (drier) conditions than others. [12] [36] and [31] have shown in their research that soil depth and fertility, environment and age of individuals can influence the architectural development of a species. [37] and [38] have indicated in their studies that climate or ecological gradient has an effect on plant morphology. Similarly, the studies of [39] [40] and [41] indicated that the origin of differences in tree morphology is due to factors such as soil type, age and genetic characteristics of individuals.

In adult trees, the results showed that neither the environment nor the locality has a global and statistical influence on the morphology of the growth units. In fact, these trees were grouped by category on the basis of their dendrometric size without precise knowledge of the age of each individual. This remains a major weakness for this study. Furthermore, the axes evaluated were randomly selected at the top of the trees without sorting by axis category. It was found that on the secondary axes selected from adult trees, regardless of the environment and locality surveyed, the majority of terminal buds were synchronous (generalized bud break). In French Guiana, [42] had observed the same phenomenon on *Parkia velutina*. According to them, at the tree level the phenological cycle (leaf fall, elongation of growth units and formation of growth rings) was synchronous and affected all axes, whereas at the population level trees could be desynchronised. They later concluded that it was possible to date a branch by counting the number of growth units or growth rings over many years with reasonable error. However, it was still difficult to estimate the exact month of their formation in order to study climatic influences.

In old trees, the analyses of variance showed that the two habitats considered and the locations surveyed had no significant effect on the dendrometric parameters and the morphology of the growth units. This is due to the age and physiological state of these individuals. Indeed, all individuals of this age were confused due to the high intraspecific similarity. All old individuals observed in any environment had almost identical qualitative and quantitative aspects (dendrometry and morphology of growth units). At this stage the architecture can evolve, the structure of the tree is degrading and homogeneous from one individual to another. According to [4], whatever the age of the plant, young or old, the distribution of aerial and underground organs (leaves, internodes, phytomeres, growth units) is a conflict between two contradictory influences: firstly, the genetic programme for growth and development dictates architectural rules; inherent in the genome, these rules are stable and predictable in the species considered. On the other hand, adverse ecological factors (light, wind, animals, etc.), which are naturally random, often distort the architectural programme.

The Pearson matrix showed a strong positive correlation between the morphological parameters evaluated on the modules. This means that as one variable increases, the second variable also increases. For example, as module 1 gets longer, their diameter increases and the number of leaves increases. The correlation between the different dimensions of organ morphology has been demonstrated in the studies of [43] and [44]. Also, [45] and [46] obtained similar results on *Tectona grandis* and African coffee species respectively. However, in their studies, relationships between organ sizes of individuals from different environments were not established as was the case in our study. The allometric equations established by the linear model could be used to reduce the effort of collecting field data between the variables used and the two habitats considered if the relationships (R^2 and r) were strong (R^2 and $r > 0.7$). This is not the case.

5. Conclusions

This work firstly allowed us to understand and characterise architectural development in *Parkia biglobosa* and secondly to highlight the variability of morphological markers at the end of the axes in the crown of the trees. Thus, the architectural development of a plant is a succession of ordered and precise sequences of morphological differentiations that can be translated into a modification in the expression of meristem function during ontogeny. The establishment of this sequence results in a repetition of homologous elementary entities during key stages corresponding to the degrees of complexity of the plant's structure. The specific average architectural organisation constitutes the architectural unit of the species. *Parkia biglobosa* follows the Champagnat architectural model (plant with a mixed vegetative axis, the main stem is orthotropic in its proximal part and plagiotropic "collapses" in its distal part) before transiting to the Troll model in the adult and old stage (plant with a plagiotropic axis in the proximal and distal part, the trunk is built up by superimposing a collapsed relaying axis that gradually straightens, sympodial branching, amphitome and epitome, defined growth, mixed sexuality). This species has up to 6 orders of branching due to several reiterated sympodial structures forming arches. The architectural unit consists of three categories of axes. Its structure is established in three phases: initiation of development and establishment of the crown, then establishment of the architectural unit and finally duplication of the architecture by a series of partial and total reiterations.

The level of organisation of the species is 5: the phytomere, the growth unit or module, the axis, the architectural unit and the whole tree (reiterated complex). This information allows us to understand the sequential development of the overall structure of *P. biglobosa*. Its architectural unit is thus its smallest stem structure necessary to reach its sexual maturity stage and thus complete its life cycle by forming flowers and fruits. This study is an introduction to the architectural study of this species and the information provided will serve as a basis for further research into the architecture in relation to the sustainable use of this species.

Acknowledgements and Funding

This study was financed by the Ministry of Higher Education and Scientific Research of Côte d'Ivoire, the French Development Agency and the IRD (Institute of Research for Development) within the framework of PRESeD-CI 2 (Renewed Partnership for Research for Development in Côte d'Ivoire) and the C2D (Debt Relief Contract) of the AMRUGE-CI project (Support for the Modernisation and Reform of the Universities and Grandes Ecoles of Côte d'Ivoire) The authors would like to thank **Yves CARAGLIO** for his orientation and advice, and the Centre de Coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) for providing the technical equipment necessary for the study.

Author's Declaration

Beda Innocent Adji took the experimental measurements, analyzed the data and wrote the article. **Yves Caraglio** provided ideas of the paper. **Doffou Sélastique Akaffou, Véronique Letort, Mengzhen Kang, Xiujuan Wang, Marc Jaeger, Philippe De Reffye and Sylvie Annabel Sabatier** supervised the work. **Jerôme Duminil, Kouadio Henri Kouassi and Yao Patrice Houphouet** are the project coordinators.

Conflicts of Interest

The authors have no conflicts of interest to declare.

References

- [1] Nicolini, E. (1998) Architecture et gradients morphogénétiques chez de jeunes hêtres (*Fagus sylvatica* L. Fagaceae) en milieu forestier. *Canadian Journal of Botany*, **76**, 1232-1244. <https://doi.org/10.1139/b98-053>
- [2] Heuret, P., Nicolini, E., Edelin, C. and Roggy, J.C. (2003) Approche architecturale pour l'étude des arbres de forêt tropicale humide guyanaise. *Revue Forestière Française*, **55**, 158-178. <https://doi.org/10.4267/2042/5769>
http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/2042/5783/2/340_350.pdf.txt
- [3] Keller, R. (2016) Architecture de plantes au Bois de la Ville, le 23 avril 2016. *Bulletin du Cercle vaudois de botanique*, **46**, 9-16.
- [4] Hallé, F. and Keller, R. (2019) Mais d'où viennent les plantes? Actes Sud., 179 p.
- [5] Barthélémy, D. and Caraglio, Y. (2007) Plant Architecture: A Dynamic, Multilevel and Comprehensive Approach to Plant Form, Structure and Ontogeny. *Annals of Botany*, **99**, 375-407. <https://doi.org/10.1093/aob/mcl260>
- [6] Taugourdeau, O., Chaubert-Pereira, F., Sabatier, S. and Guédon, Y. (2012) Deciphering the Developmental Plasticity of Walnut Saplings in Relation to Climatic Factors and Light Environment. *Journal of Experimental Botany*, **62**, 5283-5296. <https://doi.org/10.1093/jxb/err115>
- [7] Sabatier, S., Caraglio, Y. and Drénou, C. (2014) L'architecture des arbres au service des forestiers. *Innovations Agronomiques*, **41**, 119-128.
- [8] Bathélemy, D. (1988) Architecture et sexualité chez quelques plantes tropicales: Le concept de floraison automatique. Thèse de doctorat, U.S.T.L. de Montpellier.
- [9] Barthélemy, D. (1991) Levels of Organization and Repetition Phenomena in Seed Plants. *Acta Biotheoretica*, **39**, 309-323. <https://doi.org/10.1007/BF00114184>
- [10] Barthélemy, D., Edelin, C. and Hallé, F. (1989) Architectural Concepts for Tropical Trees. In: Holm-Nielsen, L.B. and Balslev, H., Eds., *Tropical Forests: Botanical Dynamics, Speciation and Diversity*, Academic Press, Cambridge, 89-100. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-353550-4.50015-0>
- [11] Barthélemy, D., Caraglio, Y. and Costes, E. (1997) Architecture, gradients morphogénétiques et âge physiologique chez les végétaux. In: Bouchon, J., de Reffye, P., Barthélemy, D. (Eds.), *Modélisation et simulation de l'architecture des végétaux*. INRA éditions, Paris, 89-136.
- [12] Sabatier, S. (1999) Variabilité morphologique et architecturale de deux espèces de Noyers: *Juglans regia* L., *Juglans nigra* L. et deux Noyers hybrides interspécifiques. Thèse de Doctorat, Biologie végétale, sciences et techniques du Languedoc, Univer-

- sité de Montpellier II, 143 p. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00106305>
- [13] Lauri, P.É. (2007) Differentiation and Growth Traits Associated with Acrotony in the Apple Tree (*Malus x domestica* Rosaceae). *American Journal of Botany*, **94**, 1273-1281. <https://doi.org/10.3732/ajb.94.8.1273>
- [14] Rosati, A., Paoletti, A., Caporali, S. and Perri, E. (2013) The Role of Tree Architecture in Super High Density Olive Orchards. *Scientia Horticulturae*, **161**, 24-29. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.06.044>
- [15] Cilas, C., Bar-hen, A., Montagnon, C. and Godin, C. (2006) Definition of Architectural Ideotypes for Good Yield Capacity in *Coffea canephora*. *Annals of Botany*, **97**, 405-411. <https://doi.org/10.1093/aob/mcj053>
- [16] Schnitzler, A. (2001) L'intérêt du modèle architectural dans l'analyse de la biodiversité forestière. Application à la gestion des réserves naturelles rhénanes. Rev. For. Fr. LIII numéro spécial. 217-225. <https://doi.org/10.4267/2042/5299>
- [17] Hallé, F. and Edelin, C. (1986) L'analyse architecturale des arbres. *6ème Colloque sur les recherches fruitières*, Bordeaux, 10-11 décembre 1986, 5-19.
- [18] Avana-Tientcheu, M.L.A., Keouna, S., Dongock, N.D. and Mouga, M.B. (2019) Structure des peuplements et potentiel de domestication de *Parkia biglobosa* dans la région de Tandjilé-Ouest (Tchad). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **13**, 219-236. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v13i1.19>
- [19] Houndonougbo, J.S.H., Kassa, B., Mensah, S., Salako, V.K., Glèlè-Kakaï, R. and Assogbadjo, A.E. (2020) A Global Systematic Review on Conservation and Domestication of *Parkia biglobosa* (Jacq.) R. Br. ex G. Don, an Indigenous Fruit Tree Species in Sub-Sahara African Traditional Parklands: Current Knowledge and Future Directions. *Genetic Resources and Crop Evolution*, **67**, 1051-1066. <https://doi.org/10.1007/s10722-020-00892-w>
- [20] Adji, B.I., Akaffou, D.S. and Sabatier, S. (2021) Ecological Environment Effects on Germination and Seedling Morphology in *Parkia biglobosa* in Nursery (Côte d'Ivoire) and Greenhouse (France). *International Journal of Horticulture, Agriculture and Food Science*, **5**, 2456-8635. <https://doi.org/10.22161/ijhaf.5.5.1>
- [21] Sina, S. (2006) Reproduction et Diversité Génétique chez *Parkia biglobosa* (Jacq.) G.Don. PhD Thesis, Wageningen University, Wageningen, 102 p.
- [22] Adji, B.I., Akaffou, D.S., Kouassi, K.H., Houphouet, Y.P., Duminiel, J. and Sabatier, S. (2021) The Effect of Four Abiotic Factors on Macro-Anatomical Markers Development in *Parkia biglobosa*, Jack, R. Br., 1830 (Fabaceae) Crown. *American Journal of Plant Sciences*, **12**, 645-661. <https://doi.org/10.4236/ajps.2021.124044>
- [23] Hallé, F. and Oldeman, R.A.A. (1970) Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux. Masson, Paris, 178.
- [24] Hallé, F., Oldeman, R.A.A. and Tomlinson, P.B. (1978) Tropical Trees and Forests: An Architectural Analysis. Springer-Verlag, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-81190-6>
- [25] Edelin, C. (1984) L'architecture monopodiale: L'exemple de quelques arbres d'Asie tropicale. Thèse de Doctorat d'État, Université Montpellier II, Montpellier.
- [26] Millan, M. (2016) Analyse de la variabilité des traits architecturaux des formes de croissance dans les communautés végétales. Thèse de Botanique, Université de Montpellier, Montpellier, 178 p.
- [27] Oldeman, R.A.A. (1990) Forests: Elements of Silvology. Springer Verlag, Science & Business Media, Berlin, 624 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-75211-7>
- [28] Nicolini, E. (2000) Nouvelles observations sur la morphologie des unités de croissance

- du hêtre (*Fagus sylvatica* L.) Symétrie des pousses, reflet de la vigueur des arbres. *Canadian Journal of Botany*, **78**, 77-87. <https://doi.org/10.1139/b99-162>
- [29] Heuret, P., Barthélémy, D., Nicolini, E. and Atger, C. (2000) Analyse des composantes de la croissance en hauteur et de la formation du tronc chez le Chêne sessile (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) (Fagaceae) en sylviculture dynamique. *Canadian Journal of Botany*, **78**, 361-373. <https://doi.org/10.1139/b00-012>
- [30] Anest, A., Tristan, C.D., Maurin, O., Millan, M., Edelin, C. and Tomlinson, K.W. (2021) Evolving the Structure: Climatic and Developmental Constraints on the Evolution of Plant Architecture. A Case Study in Euphorbia. *New Phytologist*, **231**, 1278-1295. <https://doi.org/10.1111/nph.17296>
- [31] Calonnec, A. (2013) Façonner l'architecture végétale pour contrôler les maladies des plantes. *Biofutur*, **343**, 37-42.
- [32] Abidi, F. (2012) Effets de la qualité de la lumière sur l'élaboration de l'architecture du rosier buisson. Thèse de doctorat, l'Université de Tunis El Manar, Tunisie, 277 p.
- [33] Tousignant, M.E. and Delorme, M. (2006) Connaître le fonctionnement de la plante pour mieux gérer son environnement. Article paru dans Québec Vert (IQDHO) Adapté de Understanding Plant Growth: A Review of the Basics, conférence présentée lors de l'Ohio International Short Course 2005 par Paul A. Thomas et Bodie V. Pennisi, de l'Université de Georgie, et bonifié par l'équipe de l'IQDHO. 3 p.
- [34] Dagba, E. (1974) Contribution à l'étude de l'influence du milieu sur la croissance et le développement de quelques cultivars de niébé, *Vigna unguiculata* (L) Walp. Thèse de doctorat, Sciences exactes et naturelles de l'Université de clermont-ferrand. 136 p.
- [35] Mouravieff, I. (1958) Action de la lumière sur la cellule végétale. *Bulletin de la Société Botanique de France*, **105**, 467-475. <https://doi.org/10.1080/00378941.1958.10835187>
- [36] Lauri, P.E., Kelner, J.J., Trottier, J.C. and Costes, E. (2010) Insights into Secondary Growth in Perennial Plants: Its Unequal Spatial and Temporal Dynamics in the Apple (*Malus domestica*) Is Driven by Architectural Position and Fruit Load. *Annals of Botany*, **105**, 607-616. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq006>
- [37] Maranz, S. and Wiesman, Z. (2003) Evidence for Indigenous Selection and Distribution of the Shea Tree, *Vitellaria paradoxa*, and Its Potential Significance to Prevailing Parkland Savanna Tree Patterns in Sub-Saharan Africa North of the Equator. *Journal of Global Biogeography*, **30**, 1505-1516. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2003.00892.x>
- [38] Soloviev, P., Niang, T.D., Gaye, A. and Totte, A. (2004) Variabilité des caractères physicochimiques des fruits de trois espèces ligneuses de cueillette, récoltés au Sénégal, *Adansonia digitata*, *Balanites aegyptiaca* et *Tamarindus indica*. *Fruits*, **59**, 109-119. <https://doi.org/10.1051/fruits:2004011>
- [39] Salazar, R. and Quesada, M. (1987) Provenance Variation in *Guazuma ulmifolia* L. in Costa Rica. *Commonwealth Forestry Review*, **66**, 317-324.
- [40] Assogbadjo, A.E., Sinsin, B., Codjia, J.T.C. and Van Damme, P. (2005) Ecological Diversity and Pulp, Seed and Kernel Production of the Baobab (*Adansonia digitata*) in Benin. *Belgian Journal of Botany*, **138**, 47-56.
- [41] Assogbadjo, A. E., Kyndt, T., Sinsin, B., Gheysen, G. and Van Damme, P. (2006) Patterns of Genetic and Morphometric Diversity in Baobab (*Adansonia digitata* L.) Populations across Different Climatic Zones of Benin (West Africa) *Annals of Botany*, **97**, 819-830. <https://doi.org/10.1093/aob/mcl043>
- [42] Nicolini, E., Beauchêne, J., Leudet de la Vallée, B., Ruelle, J., Mangenet, T. and

- Heuret, P. (2012) Dating Branch Growth Units in a Tropical Tree Using Morphological and Anatomical Markers: The Case of *Parkia velutina* Benoist (Mimosoïdeae). *Annals of Forest Science*, **69**, 543-555. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0172-1>
- [43] Sabatier, S., Barthélémy, D., Ducouso, I. and Germain, E. (1998) Modalités d'allongement et morphologie des pousses annuelles chez le noyer commun, *Juglans regia* L. "Lara" (Juglandaceae). *Canadian Journal of Botany*, **76**, 1253-1264. <https://www.nrcresearchpress.com> <https://doi.org/10.1139/b98-055>
- [44] Dambreville, A., Lauri, P.E., Normand, F. and Guedon, F. (2014) Analysing Growth and Development of Plants Jointly Using Developmental Growth Stages. *Annals of Botany*, **115**, 93-105. <https://doi.org/10.1093/aob/mcu227>
- [45] Tondjo, K., Brancheriau, L., Sabatier, S., Kokutse, A.D., Kokou, K., Jaeger, M., De Refye, P. and Fourcaud, T. (2018) Stochastic Modelling of Tree Architecture and Biomass Allocation: Application to Teak (*Tectona grandis* L. f.), a Tree Species with Polycyclic Growth and Leaf Neof ormation. *Annals of Botany*, **121**, 1397-1410. <https://doi.org/10.1093/aob/mcy040>
- [46] Okoma, P., Akafou, S., De Refye, P., Hamon, P., Hamon, S., Konan, O., Kouassi, K.H., Legnate, H., Letort, V. and Sabatier, S. (2016) Estimation of Stem and Leaf Dry Biomass Using a Non-Destructive Method Applied to African Cofea Species. *Agroforestry Systems*, **92**, 667-675. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-0031-z>

Annex—Glossary

Plant architecture: the way in which the plant builds its structure at a given moment of its existence (mode of growth, branching, differentiation of axes and position of sexuality); this expression designates the series of structural characteristics expressed by a plant during its development (ontogeny) but also the method of study of the spatio-temporal organisation of the plant structure.

Architectural unit (AU): A very stable elementary architecture of a plant. Each plant species has a small and finite number of axis categories. All these categories, with their precise functions, constitute the Architectural Unit of the species.

Architectural model: a series of architectures that follow one another under stable and unconstrained ecological conditions, from germination to flowering, and which result from the expression of its genetic heritage. The typology of architectural patterns is based on the observation of four main groups of morphological characters: growth (rhythmic or continuous), branching (absence or presence, monopodial or sympodial, rhythmic, continuous or diffuse), direction of growth of the axes and position of sexuality. Each model corresponds to a particular combination of these architectural characteristics.

Growth unit: a portion of the stem established during an uninterrupted period of elongation.

Phyllotaxis: the arrangement of leaf organs along an axis. When a single leaf is borne at each node, the phyllotaxy is said to be alternate. In this case, if the successive leaves are positioned in the same plane and form an angle of 180° in pairs, the phyllotaxy is called distichous alternating. Conversely, if the leaves are arranged in several directions around the axis in a single virtual spiral, the phyllotaxy is called spiral alternation. When several leaves are inserted at the same node, the phyllotaxy is called whorled. A special case of whorled phyllotaxy is the opposite phyllotaxy where two leaves are inserted at the same node.

Monopodial development: axis built by a single apical meristem; the growth of an axis is ensured indefinitely by the same meristem or apical bud (mechanism of apical abscission without sexuality).

Pseudomonopodial development: non unique axis imitating monopodial development (masked sympod).

Sympodial development: not a single axis but a set of axes (succession of elementary axes with apical flowering or terminated by apical structures related to flowers, spines, tendrils, parenchyma domes, etc.); the construction of an axis is ensured by a succession of superimposed segments originating from different lateral buds (linear succession of elementary axes, each of which is built by a short-lived meristem).

Sympode: In sympodial or sympodial branching the terminal meristem of the supporting axis dies or is transformed into a structure that loses its ability to grow vegetatively. Further growth is then ensured by the functioning of one or more lateral meristems which will build as many lateral axes or relay axes, and

the branched whole will be called a sympod. Depending on whether this branching leads to the formation of one, two or more relays, we speak respectively of a **monochasial, dichasial or polychasial sympod**.

Branching: the appearance of a branch on the trunk and, more generally, of an $N + 1$ axis on an N axis. The two axes, N and $N + 1$, have the same age in case of immediate branching; $N + 1$ is younger than N in case of delayed branching. This is the fact that a morphological unit of the plant body gives rise to one or more new units of the same fundamental nature as itself. The moment of development of a lateral branch is described as delayed or immediate, depending on whether or not it follows a resting phase after initiation of the lateral meristem by the terminal meristem. When all the axillary meristems of a stem give rise to a branch, the branching is said to be **continuous**; when the branches are grouped in distinct stages, the branching is said to be **rhythmic**; finally, when the arrangement of the branches is different from the two previous cases, the branching is said to be **diffuse**.

Rhythmic growth: axes that show a marked endogenous periodicity of elongation.

Orthotropic axis: when the direction of the axes is vertical.

Plagiotropic axis: when the direction of the axes is horizontal.

Ageotropic axis: when the direction of the axes is oblique (mixed between vertical and horizontal directions).

Cataphylls: the scar of the leaf outline that protected the bud before budburst.

Continuous growth: axes that do not show a marked periodicity of endogenous elongation and are said to be continuously growing.

Rhythmic growth: axes that show a marked periodicity of endogenous elongation.

Immediate or immediately developing shoots: growth without dormancy phase of the bud, the shoots develop on the shoot that is elongating and are generally located in the middle of this bearing shoot.

Delayed twigs or delayed developing shoots: dormancy (resting) phase of the lateral bud, the twigs develop the year after the elongation of the bearing shoot.

Hypopodium: very long internode set in the case of an immediate shoot, length of internode between the base of the shoot and the first leaf.

Polycyclism: the annual shoot is composed of 2 or more growth units.

Monocyclism: the annual shoot is composed of a single growth unit.

Acrotony: preferential development of lateral axes at the top of a shoot or at the end of the growth unit.

Basitony: preferential development of twigs at the base of the bearing entity or growth unit.

Mesotony: the twigs develop in a privileged way in the median zone of the bearing unit.

Hypotony: twigs with a large diameter are distributed on the lower part of the branches.

Epitony: distribution of branches on the upper side of the axes and branches.

Amphitony: when the branches are carried preferentially in a horizontal plane on either side of the bearing axis.

NB: **hypotony** and **amphitony** are involved in the extension of the branches and may overlap.

Epicormic shoot (offshoot or supplanter): a shoot developing from a dormant lateral bud on the trunk or on main branches.

Reiteration: A reiteration is a young tree growing on an old supporting axis. The position of reiteration is not predictable, it is determined by the presence of a local energy resource, or trauma. The reiteration has a dual function of exploiting light resources and ensuring resilience to trauma. It is said to be total if it appears on the trunk of the tree and partial if it appears on other types of axis.

Forking: formation of two or more morphologically identical relay axes in a sympod from the apical trauma of a single axis.

PUBLICATION 8

Beda Innocent Adji, Doffou Sélastique Akaffou and Sylvie Sabatier. 2022.

VARIATION ON GROWTH UNIT MORPHOLOGY IN *KHAYA SENEGALENSIS* (DESR.)
A. JUSS. (MELIACEAE) AND *PTEROCARPUS ERINACEUS* POIR. (FABACEAE)
ACCORDING TO HABITAT AND CLIMATE. *Bois et Forêts des Tropiques*.

Variation in growth unit morphology in *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. (Meliaceae) and *Pterocarpus erinaceus* Poir. (Fabaceae) according to habitat and climate

Beda Innocent ADJI¹
Doffou Sélastique AKAFFOU¹
Sylvie SABATIER²

¹ Université Jean Lorougnon Guédé
UFR Agroforesterie
BP 150, Daloa
Côte d'Ivoire

² Cirad, UMR AMAP
Université Montpellier II
Cirad, CNRS, INRAE, IRD
34398 Montpellier
France

Auteur correspondant /
Corresponding author:

Beda Innocent ADJI –
adjibedainnocent@gmail.com /
adjji_beda@ujlg.edu.ci

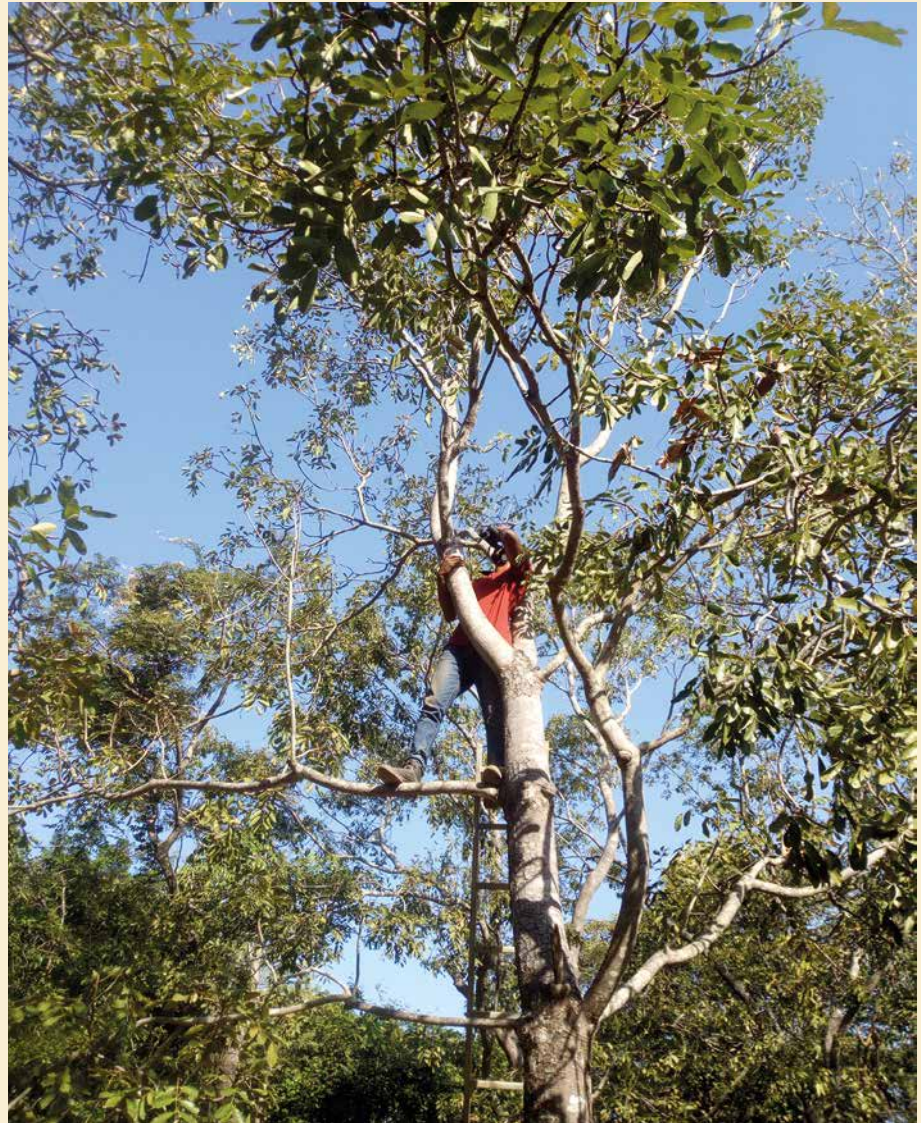


Photo 1.

Fine counting of axes growth markers in the crown of a *Khaya senegalensis* tree using binoculars.
Photo B. I. Adji.

Doi : 10.19182/bft2022.354.a36768 – Droit d'auteur © 2022, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 27 août 2021 ;
date d'acceptation : 5 juillet 2022 ; date de publication : 1^{er} décembre 2022.



Licence Creative Commons :
Attribution - 4.0 International.
Attribution-4.0 International (CC BY 4.0)

Citer l'article / To cite the article

Adji B. I., Akaffou D. S., Sabatier S., 2022. Variation in growth unit morphology in *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. (Meliaceae) and *Pterocarpus erinaceus* Poir. (Fabaceae) according to habitat and climate. Bois et Forêts des Tropiques, 354 : 41-54. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2022.354.a36768>

RÉSUMÉ

Variation de la morphologie des unités de croissance des essences *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. (Meliaceae) et *Pterocarpus erinaceus* Poir. (Fabaceae) selon l'habitat et le climat

L'analyse rétrospective repose sur l'accès à des chronoséries longues sur la croissance permettant de comprendre et d'interpréter le fonctionnement structural des houppiers, comme l'exige la gestion durable des peuplements. L'objectif de cette étude était d'évaluer le développement et l'adaptation des houppiers de *Khaya senegalensis* et *Pterocarpus erinaceus* à un environnement changeant, afin de préparer l'établissement de parcelles permanentes. Les morphologies des unités de croissance (UC) des axes de 420 individus jeunes, adultes et âgés ont été analysées en plein soleil ou à l'ombre pendant la saison des pluies et la saison sèche dans sept sites en Côte d'Ivoire. Les résultats montrent que la morphologie de ces unités de croissance est un indicateur à la fois de l'expression du développement et des difficultés de développement des essences. L'hétérogénéité des habitats n'avait aucun effet significatif sur la morphologie des unités de croissance ($P > 0,05$) des deux essences. La morphologie des UC varie d'un endroit (climat) à l'autre en raison des caractéristiques environnementales distinctes ($P < 0,05$). La partie sud du gradient (Toumodi et Bouaké dans la région centrale du pays) offre des zones favorables et donc prioritaires pour les programmes de reboisement basés sur ces deux essences. L'âge des individus influence le nombre de phytomères par unité de croissance ($P < 0,05$). Les individus jeunes (boutures) sont de bons idéotypes pour la sélection de génotypes suffisamment résistants. Quelle que soit l'essence, la saison des pluies augmente le taux de réussite de l'établissement des parcelles. Les unités de croissance des deux essences sont pratiquement de la même taille ($P > 0,05$). Nos résultats pourraient servir de guide pour la prise de décision en vue de sélectionner des environnements appropriés pour la mise en œuvre de programmes de reboisement ou d'agroforesterie basés sur *K. senegalensis* et *P. erinaceus* et visant à conserver et à gérer durablement ces essences dans le contexte actuel de changement climatique.

Mots-clés : *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus*, environnement, morphologie, unité de croissance (UC), Côte d'Ivoire.

ABSTRACT

Variation in growth unit morphology in *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. (Meliaceae) and *Pterocarpus erinaceus* Poir. (Fabaceae) according to habitat and climate

Retrospective analysis relies on access to long-term growth series to understand and interpret the structural functioning of tree crowns, as required for their sustainable management. The aim of this study was to assess the development and adaptation of crown shoots in *Khaya senegalensis* and *Pterocarpus erinaceus* to a changing environment, to prepare for the establishment of permanent plots. The growth unit (GU) morphologies of the axes of 420 young, adult and old individuals were analysed in full sunlight or shade during the rainy and dry season in seven locations in Côte d'Ivoire. The results show that the morphology of these growth units is an indicator of both development expression and developmental difficulties in tree species. Heterogeneous habitat had no significant effect on growth unit morphology ($P > 0.05$) in either species. The morphology of the growth units varied from one location (climate) to another due to their distinct environmental characteristics ($P < 0.05$). The southern part of the gradient (Toumodi and Bouaké in the central region of the country) offers favourable and hence priority areas for reforestation programmes based on the two species. The age of the individuals influenced the number of phytomers per growth unit ($P < 0.05$). Young individuals (cuttings) are good ideotypes for the selection of suitably resistant genotypes. Whatever the species, the rainy season increased the success rate of plot establishment. The growth units of the two species are of practically the same size ($P > 0.05$). Our results could be a guide to decisions for the selection of suitable environments for the implementation of reforestation or agroforestry programs based on *K. senegalensis* and *P. erinaceus* and aiming to conserve and sustainably manage these species in the current climate change context.

Keywords: *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus*, environment, morphology, Growth Unit (GU), Côte d'Ivoire.

RESUMEN

Variación de la morfología de la unidad de crecimiento en *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. (Meliaceae) y *Pterocarpus erinaceus* Poir. (Fabaceae) según el hábitat y el clima

El análisis retrospectivo se basa en el acceso a series de crecimiento a largo plazo para comprender e interpretar el funcionamiento estructural de las copas de los árboles, tal y como se requiere para su gestión sostenible. El objetivo de este estudio era evaluar el desarrollo y la adaptación de los brotes de copa en *Khaya senegalensis* y *Pterocarpus erinaceus* a un entorno cambiante, para preparar el establecimiento de parcelas permanentes. Se analizaron las morfologías de las unidades de crecimiento (UC) de los ejes de 420 individuos jóvenes, adultos y viejos a plena luz solar o a la sombra durante la estación lluviosa y la estación seca en siete localidades de Costa de Marfil. Los resultados muestran que la morfología de estas unidades de crecimiento es un indicador tanto de la expresión del desarrollo como de las dificultades de desarrollo de las especies arbóreas. El hábitat heterogéneo no tuvo un efecto significativo en la morfología de la unidad de crecimiento ($P > 0,05$) en ninguna de las especies. La morfología de las unidades de crecimiento varió de un lugar (clima) a otro debido a sus distintas características ambientales ($P < 0,05$). La parte sur del gradiente (Toumodi y Bouaké, en la región central del país) ofrece zonas favorables y, por tanto, prioritarias para los programas de reforestación basados en ambas especies. La edad de los individuos influyó en el número de fitómeros por unidad de crecimiento ($P < 0,05$). Los individuos jóvenes (esquejes) son buenos ideotipos para la selección de genotipos adecuadamente resistentes. Independientemente de la especie, la temporada de lluvias aumentó la tasa de éxito del establecimiento de las parcelas. Las unidades de crecimiento de las dos especies son prácticamente del mismo tamaño ($P > 0,05$). Nuestros resultados podrían orientar en la toma de decisiones hacia la selección de entornos adecuados para implementar programas de reforestación o agroforestales basados en *K. senegalensis* y *P. erinaceus* que tengan como objetivo la conservación y gestión sostenible de estas especies en el contexto actual de cambio climático.

Palabras clave: *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus*, entorno, morfología, unidad de crecimiento (UC), Costa de Marfil.

Introduction

Plant architectural retrospective analyses, which describes the historical growth strategy of tree's species (Barthélémy and Caraglio, 2007), has been used for the phenotypic description and diagnosis of tree condition in several studies (Rutishauser *et al.*, 2011; Nicolini *et al.*, 2012; Sabatier *et al.*, 2014). It has also been used in many countries to understand and detect the impact of climate on the growth phases, development difficulties and adaptation of trees to a changing environment (Chaubert-Pereira *et al.*, 2009; Taugourdeau *et al.*, 2011). Indeed, the interpretation of primary growth markers is often neglected, despite the fact that it provides long time series on the development of tree crowns, i.e., the conditions required for sustainable management (Nicolini *et al.*, 2012). Retrospective analysis provides a better understanding in the coordination of growth processes (elongation, thickening) in the crown, in the morphology and anatomy during the long-term development of trees and in the causes of observed variations (Nicolini and Caraglio, 1994; Nicolini *et al.*, 2012). Although retrospective analysis has been proven to be very effective in assisting foresters in the diagnosis of tree condition and sustainable management of many plant genetic resources in Europe and South America, it has not been frequently applied to native forest species in sub-Saharan Africa. Yet, data acquired through the use of such a methodology can help contributing to the conservation of forest genetic resources, and thus to the resilience of forest ecosystems.

In sub-Saharan Africa, biodiversity is threatened by unhealthy and environmentally unsustainable agriculture following deforestation (REDD+, 2017). Several multiple-use species are overexploited and are consequently threatened with extinction (Ake-Assi, 1999; Kouassi *et al.*, 2019). After sharply reducing tropical rainforests, these practices are now spreading to savannah areas (54% of the surface area of Côte d'Ivoire). Reforestation and agroforestry based on local species are the two solutions chosen by Ivorian decision-makers to restore forest cover and conserve the country's wood resources (Akaffou *et al.*, 2019; REDD+, 2020). *Pterocarpus erinaceus* Poir. and *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. are species highly appreciated by the populations of the savannah zones for the quality of their wood, their use as fodder, their ability to restore the soil (as leguminous plants) and their medicinal properties. Moreover, *P. erinaceus* is a CITES-listed endangered species as well as included in the IUCN Red List (CITES, 2016; Goba *et al.*, 2019; Dumenu, 2019; Issa *et al.*, 2017; Adji *et al.*, 2020, 2021b) due to their intensive exploitation. Including them in reforestation and agroforestry programmes is one solution for their preservation and sustainable use.

In the current context of climate change, the functioning of tree crowns, genomic and environmental signatures and the species adaptation mechanisms to a changing climate all need to be taken into account to ensure their sustainable management (Nicolini, 2000; Kushwaha *et al.*, 2010; Sabatier *et al.*, 2014). Applying the retrospective method to endangered species such as *K. senegalensis* and *P. erina-*

ceus will provide information on their difficulties in developing in a given environment, enable the selection of genotypes that are resistant or adapted to certain habitats, and of priority areas favourable for forest management or agroforestry programmes (Segla *et al.*, 2020; Adji *et al.*, 2021c).

The aim of this study was to use retrospective analysis to study the development of growth units of *K. senegalensis* and *P. erinaceus* as a function of habitat (full sun and shading) and cohorts of individuals (saplings, adult tree and old tree) in the rainy and dry seasons. In this aim different individuals of these two species were analysed across a North-South bioclimatic gradient in Côte d'Ivoire. This approach allowed to: (i) identify the development mode of the two species, their difficulties in developing and adapting to climate change; (ii) identify environments or locations conducive to their cultivation; (iii) identify resistant genotypes adapted to climate variations for use in more severe environments; (iv) assess the variability of shoots according to the size of the individuals and the optimal conditions for development, and (v) Identify and characterise architectural markers that can be used to optimise reforestation success (precision forestry). The latter could help to reduce dieback of stands based on these species, and lead to their conservation and sustainable management.

Material and methods

Plant material

Observations were made on the axes of 420 individuals per species of young (age: 1 to 5 year, height: 0.1 to 6 m, dbh: 1 to 9 cm for *K. senegalensis* and age: 1 to 5 years, height: 0.1 to 5 m, dbh: 1 to 9 cm for *P. erinaceus*), adult (age: 6 to 20 years, height: 7 to 20 m, dbh: 10 to 49 cm for *K. senegalensis* and age: 6 to 20 years, height: 10 to 15 m, dbh: 10 to 39 cm for *P. erinaceus*) and old trees (age: ≥ 21 years, height: ≥ 21 m, dbh: ≥ 50 cm for *K. senegalensis* and age: ≥ 21 years, height: ≥ 16 m, dbh: ≥ 40 cm for *P. erinaceus*) arbitrarily chosen in naturally regenerated individuals by species in shady undergrowth or crowded with other surrounding species and in the full sun or isolated (table I). Dendrometric characteristics and visual architectural appearance (physiological condition, decay, crown appreciation and visual aspect, ring colour, etc.) were used to estimate the age of trees and categorized them into the three development stages, i.e. young, adult and old ones. The number of individuals per type of habitat and per age category, as well as the types of axes assessed are detailed in table I.

Study sites

The study took place in seven sites locations along a north-south bioclimatic gradient in Côte d'Ivoire (table II). These locations were chosen according to a decreasing gradient of vegetation density harbouring stands of *K. senegalensis* and *P. erinaceus* (figure 1).

Table I.

Dendrometric and age criteria, number of material and type of axis evaluated as a function of age and habitat in the two-target species.

	Development stage	Habitat/ environment	Tree height (m)			Tree diameter (cm)			N° of individ.	Axis examined
			Min	Max	Mean	Min	Max	Mean		
<i>Khaya senegalensis</i>	Young-tree (1-5 Yr) H (m): 0.1-6; D (cm): 1-9	Full sunlight	0.33	5.7	1.71 ± 0.29	0.52	9.74	3.54 ± 1.29	70	Main stem
		Shade	0.52	4.8	2.54 ± 0.15	1.18	8.85	5.39 ± 1.07	70	Main stem
	Adult-tree (6-20 Yr) H (m): 7-20; D (cm): 10-49	Full sunlight	7.5	17	14.09 ± 5.6	14.3	49.62	34.97 ± 4.01	70	Branch
		Shade	7.4	18.5	11.6 ± 6.18	12.3	45.92	29.08 ± 2.97	70	Branch
	Old-tree (≥21 Yr) H (m): ≥21; D (cm): ≥50	Full sunlight	21	37	31.46 ± 4.4	44	276.08	100.02 ± 57.	70	Branch
		Shade	20.5	34	28.76 ± 5.5	34.3	129.3	80.44 ± 34.8	70	Branch
<i>Pterocarpus erinaceus</i>	Young-tree (1-5 Yr) H (m): 0.1-5; D (cm): 1-9	Full sunlight	0.27	3.8	1.83 ± 0.51	0.38	9.59	3.21 ± 0.49	70	Main stem
		Shade	0.28	4.3	2.32 ± 0.59	0.54	9.20	3.93 ± 0.69	70	Main stem
	Adult-tree (6-20 Yr) H (m): 10-15; D (cm): 10-39	Full sunlight	10.1	15.6	12.18 ± 2.3	21.4	36.62	27.37 ± 4.93	70	Branch
		Shade	10.8	14.5	11.94 ± 3.1	14.2	38.1	24.6 ± 6.28	70	Branch
	Old-tree (≥21 Yr) H (m): ≥16; D (cm): ≥40	Full sunlight	16.5	19.5	17.78 ± 1.8	40.3	71.4	53.82 ± 12.1	70	Branch
		Shade	17	22	19.3 ± 3.2	41.7	63	50.51 ± 10.7	70	Branch

Yr = age in years; Tree-diam = diameter of tree or diameter of tree at breast height; Min = minimum; Max = maximum; m = meter; cm = centimetre; N° of indiv. = number individuals evaluated.

Sampling

Choice of individuals

In each species and tree development stage (young, adult and old), 10 individuals were arbitrarily and randomly selected in open and closed areas in the seven above-mentioned locations (Ferké, Korhogo, Niakara, Katiola, Bouaké, Toumodi and Daloa) during the rainy season (optimal conditions) and the dry season (limiting conditions) (Nicolini and Caraglio, 1994). Thus, we obtained: 10 individuals * 2 zones (Undergrowth/Shade and Full sun) * 3 stages (young, adult and old) * 7 localities = 420 individuals (table I). The development stages (young, adult and old) were chosen arbitrarily based on the height and diameter (dbh) of individuals grown in nurseries and from individuals present in former plots established by the National Center for Agronomic Research (CNRA) of Côte d'Ivoire in the 1980s, then by a field

survey questionnaire containing the approximate age of the sampled trees, submitted to the rural populations who owned the plots surveyed in the forest.

Choice of habitats

Although both species are heliophiles (tree savannah/open forest and grassy savannah species), two types of environments were considered: undergrowth and full sun. Individuals in the undergrowth lived in a very shady environment with a forest cover or in an overcrowded environment or benefited from more shelter. Individuals in the second category were growing isolated in full sun or in an open environment with direct access to sunlight.

Choice of axis types

Observations were made on different types of axis in two different habitats depending on the accessibility of the

Table II.
 Characteristics of the locations surveyed.

Sites/ locations	GPS coordinates	Vegetation	Climate	Temperature (°C)	Rainfall (mm/year)	Soil type
Ferké	5° 23' 43,39644" W; 9° 36' 1,87056" N	Grassy savannah	Dry tropical	27-40	263-1200	Ferralitic soils (Ferrisols, Cambisols, . Fluvisols, Luvisols), highly to moderately desaturated
Korhogo	5° 36' 12,39612" W; 9° 33' 24,68988" N	Open forest (wooded savannah)	Dry tropical	26,6- 35,7	817 - 1216	Ferruginous (90%) and Ferralitic (10%): superficial gravelly soil, deep gravel with a heavy texture, low in organic matter, highly desaturated
Niakara	5° 18' 40,73544" W; 8° 40' 47,97912" N	Wooded and grassy savannah	Dry tropical	24,7-38	800-1230	Complex of slightly desaturated ferrallitic soils and eutrophic brown tropical soils derived from basic rocks
Katiola	5° 7' 35,814" W; 8° 13' 53,94" N	Wooded and grassy savannah	Dry tropical	24-36	1100-1200	Moderately and highly desaturated ferrallitic soils
Bouaké	5° 5' 47,3289" W; 7° 40' 45,335" N	Clear forest (wooded savannah)	Wet tropical	23,6-34	1100-1200	Gravelly, moderately saturated, reworked, shallow ferralitic gravel from a granitic alteration material with a sandy-clay texture
Toumodi	5° 1' 34,95576" W; 6° 22' 42,67848" N	Open forest (wooded savannah, grassland and gallery forests)	Wet tropical	26,6-30	1092-1200	Ferralitic soil on granitic bedrock (sandy-clayey soil), characterised by the weak differentiation and friable consistency of their horizons
Daloa	6° 26' 9,19788" W; 6° 54' 32,058" N	Tropical rainforest	Wet tropical	21-34	1000 -1900	Ferralitic, deep, acidic and desaturated in exchangeable bases, rich in organic matter

°C = Celsius degree; mm = millimetre; W = west; N = north.

crowns. In young trees, the axes evaluated were the main trunks due to the ease of access and the rareness of secondary branches on all individuals in this category. In adult and old trees, the axes evaluated were branches, tertiary branches and short twigs depending on accessibility. Young trees were assessed on site; whereas the branches of adult and old trees were cut and transported back to the laboratory for assessment (Nicolini and Caraglio, 1994; Adji *et al.*, 2021a).

Identification and observation of growth units

The growth unit is defined based on morphological markers which result from the functioning of meristems and which remain unchanged for several years. These morphological

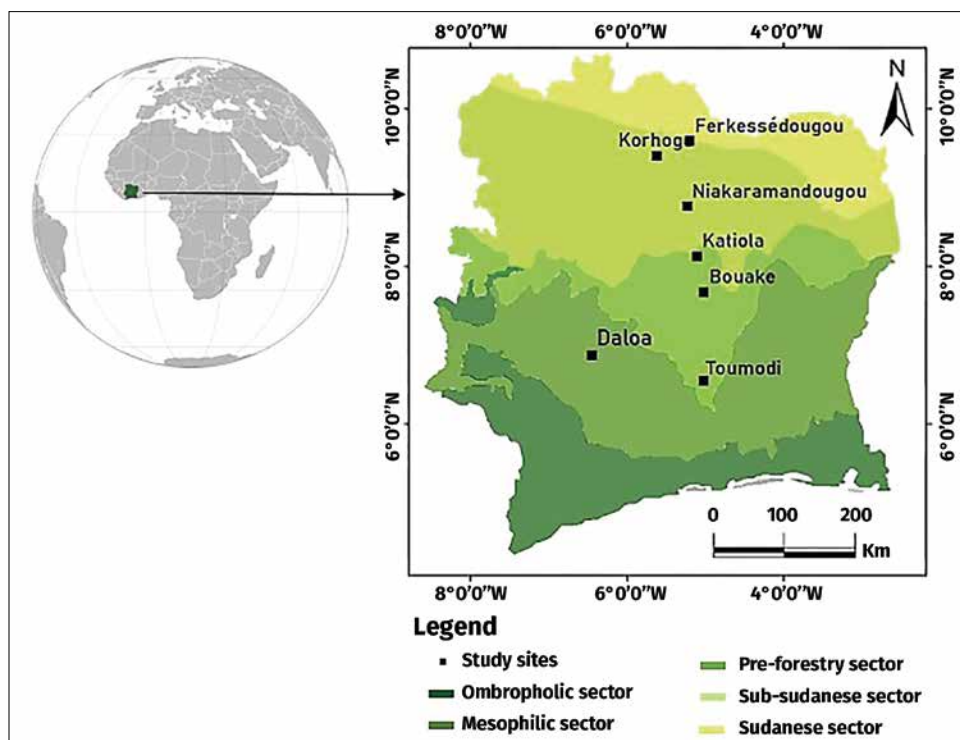


Figure 1.
 Geographical location of the study area.

markers include the scars left by the scales of a bud, cataphylls and deciduous leaves, naturally pruned twigs, a bend in the axis at the site of apical necrosis or trauma, and the texture of the bark. The growth unit or elongation unit or morphological unit or extension unit (Hallé and Martin, 1968; Sabatier, 1999; Barthélémy and Caraglio, 2007; Millan, 2016) corresponding to all the organs initiated by the apical meristem during an uninterrupted organogenesis and elongation phase is delimited at its base by a large number of scars or pairs of scales (7 to 16) left by the terminal bud. This character can thus retrospectively enable identification of the successive growth units arranged along a leafy stem.

In general, two types of shoots are produced by the establishment of growth units by the terminal bud in temperate zones: monocyclic shoots (a single growth unit during one year or a wave of growth in spring) and polycyclic shoots (several growth units during one year or in growth waves in spring and summer) (Thiébaud, 1982; Nicolini and Caraglio, 1994; Barthélémy and Caraglio, 2007). The first growth unit (spring growth wave) is qualified as pre-formed (in the sense of Hallé *et al.*, 1978: presence of all the leaf organs of the future growth units in the bud before budburst), whereas other organs in the growth unit are qualified as neo-formed (simultaneous prolonged establishment of the leaf organs by the apical meristem after the pre-formed organs). In the tropics, the majority of shoots are polycyclic due to the rhythmicity adopted by the species in this zone (Hallé *et al.*, 1978; Hallé and Keller, 2019). This is the case for *K. senegalensis* and *P. erinaceus*. Retrospective analysis allows to recognise and date different structures (axes and GU) in the crown of a plant, to quantify the development by measuring shoot dimensions, to qualify the expression of certain architectural characteristics of a species, to identify areas of favourable development for a species, to evaluate the capacity of a species to adapt to a changing climate, to apprehend the effects of environmental factors on the regeneration of a species, etc.

Parameters assessed

Retrospective analysis focused on the first four growth units starting from the apex of the sampled axis. The morphological parameters evaluated on each axis in each species were the total number of growth units in the axis, the length of each growth unit, the diameter at the beginning of the growth units, and the number of leaves or phytomers of the first four growth units (Nicolini *et al.*, 2012; Nicolini, 2000; Sabatier *et al.*, 1998; Godin and Caraglio, 1998). As a reminder, a phytomere is the

most fundamental unit of organisation of a plant, generally composed of an internode and a node with a leaf and an axillary bud. The harvested stems and branches were split longitudinally and transversally to identify growth stops (delimiting portions of the growth units) that are invisible on the bark of the axes. Data were collected during the rainy season (June and July 2020) and again from exactly the same individuals during the dry season (January and February 2021).

Statistical analysis

Statistical analyses were first performed using univariate descriptive statistics methods with XLSTAT 2020 version 7.5. The effect of habitat, location, age of individuals, season and species on the morphological parameters of the growth units was evaluated by a one-way analysis of variance (ANOVA) after square root normalisation of the data in order to maintain the database, to decrease the complexity of the comparison models and to reduce the cases of redundant data (double value and outliers) in SAS version 9.4. The homogeneity of variances was validated and the Student-Newman-Keuls test at the 5% threshold was used for post-hoc comparisons (GLM).

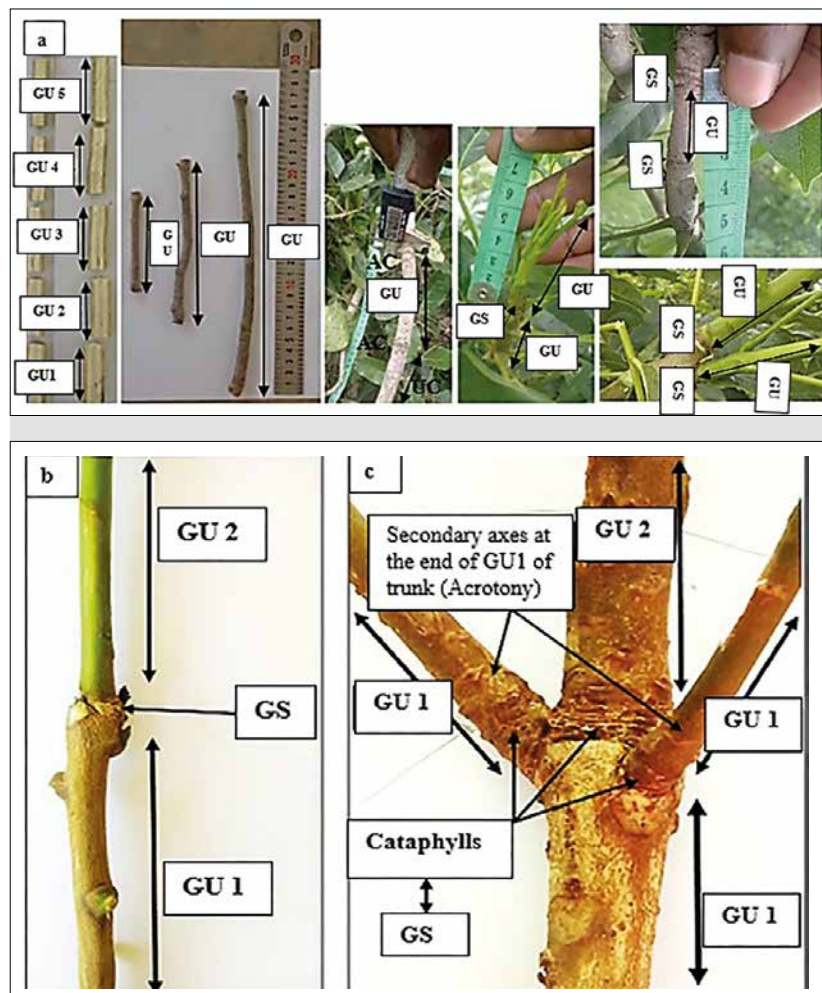


Figure 2.

a) Variation of the growth units (GU), b) Limit or growth stop (GS) of the growth units delimiting two physiological ages, c) Presence of cataphylls at the base of GUs, marking growth stop in *Khaya senegalensis*.

Results

Morphological description of the growth units (GUs)

Khaya senegalensis

Figure 2a shows variations in the size of the growth units along a foliar axis and the growth stops delimiting the portions of the growth units. figure 2b and 2c shows the growth stops (GS) between two (2) successive GUs along a leafy axis, identifiable by the cataphylls. figure 2b shows an axis consisting of two physiological ages (distinguished by colour change). These two physiological ages represent two successively formed GUs separated by an GS. The green age is the new GU, while the brown age represents the old GU. figure 2c shows cataphylls at the base of the GUs. This marks a cessation of meristem activity (GS) and the start of a new shoot (GU2).

All factors considered, in young trees of *K. senegalensis*, the number of growth units present on the observed axis ranged from 2 to 21 with an average of 7.95 ± 3.76 ; the length of growth units varied from 5.8 to 67.8 cm with an average of 23.46 ± 12.03 cm; the average diameter of the growth units ranged from 0.4 to 3.81 cm with an average of 1.34 ± 0.62 cm; the number of phytomers carried by growth units in this cohort ranged from 7 to 38 with an average of 16.32 ± 5.87 .

In adult *K. senegalensis* trees, the number of growth units on the assessed axes ranged from 5 to 14 with an average of 8.25 ± 1.94 ; the length of the growth units in this cohort ranged from 5.15 to 31.77 cm with an average of 17.38 ± 6.38 cm; the diameter of growth units ranged from 0.74 to 1.93 cm with an average of 1.33 ± 0.37 cm and the number of phytomers counted per growth unit ranged from 10.5 to 29.5 with an average of 17.75 ± 4.53 .

Finally, in old trees of *K. senegalensis*, the number of growth units present on the observed axis varied from 5 to 12 with an average of 8.25 ± 1.9 ; the length of growth units varied from 6.2 to 38.85 cm with an average of 18.02 ± 6.2 cm; the average diameter of the growth units varied from 0.74 to 2.04 cm with an average of 1.37 ± 0.33 cm; the number of phytomers carried by growth units in this cohort varied from 13 to 33 with an average of 19.78 ± 4.67 .

Pterocarpus erinaceus

Figure 3 shows the appearance of growth stops (GS), growth units (GUs) and variations in the size of the GUs along a leafy axis.

In *P. erinaceus* saplings, the number of growth units (GUs) present on the observed axis varied from 2 to 19 (average 7.94 ± 4.38); the length of the GUs varied from 6.55 to 62.4 cm (average of 21.67 ± 9.84 cm); the diameter of the GUs ranged

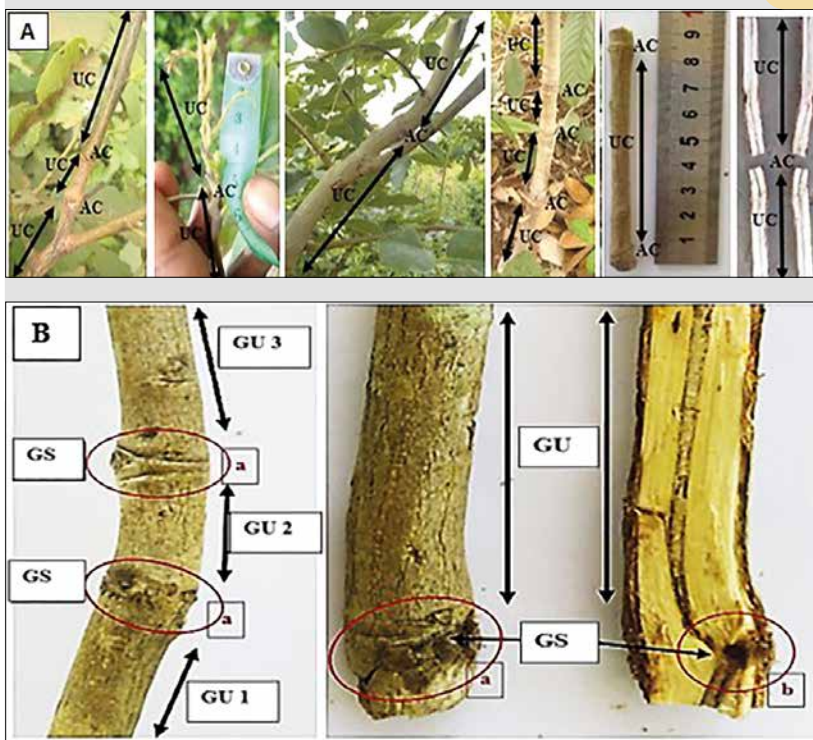


Figure 3. A) Morphology of the growth units (GU), B) Indicators of growth stop (GS) along an axis in *Pterocarpus erinaceus*: a) external scars, b) narrowing of the pith.

Table III.

Comparison of morphological growth units according to habitat type.

Species	Habitat	Axis-GU-n°	GU-length (cm)	GU-diam (cm)	GU-phyto-n°
<i>Khaya senegalensis</i>	Full sunlight	7.74 ± 0.3b	21.89 ± 1.91a	1.33 ± 0.06a	17.3 ± 0.59a
	Min-Max	2-21	5.15-67.8	0.4-3.81	7-38
	Shade	9.06 ± 0.55a	19.34 ± 1.15a	1.39 ± 0.06a	17.5 ± 0.73a
	Min-Max	4-18	5.8-40.45	0.69-2.13	9-26.75
	Pr > F	0.0379	0.2315	0.5950	0.8572
<i>Pterocarpus erinaceus</i>	Full sunlight	7.51 ± 0.39b	22.81 ± 1.13a	1.11 ± 0.06a	15.08 ± 0.64b
	Min-Max	2-17	6.55-62.4	0.32-3.11	4.5-31.5
	Shade	8.82 ± 0.54a	21.94 ± 1.01a	1.26 ± 0.18a	17.84 ± 0.71a
	Min-Max	3-19	8.9-47.4	0.47-10.51	8-31.75
	Pr > F	0.0451	0.5871	0.3739	0.0056

Values with the same letters are not statistically different at the 5% threshold (SNK). Full sunlight = open and sunny environment; Shade = crowded environment or under forest cover; Axis-GU-n° = number of growth units per axis measured; GU-length = mean length of growth units in centimeters; GU-diam = mean diameter of growth units in centimeters; GU-phyto-n° = mean number of phytomers per growth unit; Min = minimum and Max = maximum.

Table IV.
Variation in morphological parameters of the growth units according to the location.

Species	Locations	Axis-GU-n°	GU-length (cm)	GU-diam (cm)	GU-phyto-n°
<i>Khaya senegalensis</i>	Ferké	8.95 ± 0.5ab	16.68 ± 1.51c	1.44 ± 0.07b	15.77 ± 0.68b
	Min-Max	4-13	7.85-40.45	0.69-1.93	10.5-22
	Korhogo	9.13 ± 0.88bcd	18.75 ± 1.72c	1.39 ± 0.1b	17.64 ± 0.86ab
	Min-Max	5-21	5.15-46.07	0.74-2.88	9-26
	Niakara	8.39 ± 0.35bcd	18.09 ± 1.5c	1.21 ± 0.06b	20.46 ± 1.23a
	Min-Max	6-12	6.2-38.85	0.74-1.75	13-33
	Katiola	6.44 ± 0.87d	25.82 ± 2.87b	1.4 ± 0.1b	17.19 ± 1.17ab
	Min-Max	3-18	11.1-48.15	0.78-2.13	8-26.75
	Bouaké	10.64 ± 0.73a	29.68 ± 11.14a	1.91 ± 0.26a	15.89 ± 1.33b
	Min-Max	7-15	18.25-67.8	0.67-3.81	7-22.75
	Toumodi	5.5 ± 0.38cd	19.65 ± 2.41c	1.07 ± 0.09b	14.44 ± 1.18b
	Min-Max	3-8	9.97-43	0.52-1.86	8.33-25
	Daloa	7.7 ± 0.69abc	24.35 ± 2.55b	1.21 ± 0.09b	19.07 ± 1.75a
	Min-Max	2-14	10.62-47.85	0.41-1.86	8.25-38
Pr > F	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	
<i>Pterocarpus erinaceus</i>	Ferké	10.24 ± 0.94a	22.94 ± 1.49bc	1.19 ± 0.1ab	17.05 ± 1.07ab
	Min-Max	3-19	10.5-36.35	0.5-2.53	8-26
	Korhogo	8.5 ± 0.61ab	20.49-1.7bc	0.98 ± 0.06ab	15.62 ± 0.97b
	Min-Max	5-19	10.05-44.4	0.57-1.66	9-29
	Niakara	9.28 ± 0.62a	25.83 ± 1.74bc	1.25 ± 0.09ab	22.29 ± 1.02a
	Min-Max	4-14	17.2-44.08	0.69-2.27	16.5-31.75
	Katiola	7 ± 1.13c	20.56 ± 1.3bc	1.02 ± 0.08ab	15.09 ± 1.29c
	Min-Max	3-17	12.13-30.85	0.41-1.69	7-23
	Bouaké	8.21 ± 1.08ab	27.45 ± 4.08a	1.37 ± 0.19ab	16.09 ± 2.06c
	Min-Max	2-16	9.53-62.4	0.32-3.11	4.5-28.75
	Toumodi	8.35 ± 0.59ab	25.17 ± 2.12ab	1.8 ± 0.46a	16.39 ± 0.64b
	Min-Max	4-15	12.35-47.4	0.79-10.51	12.25-24
	Daloa	4.35 ± 0.39bc	15.83 ± 1.24c	0.61 ± 0.04b	10.42 ± 0.6c
	Min-Max	2-8	6.55-26.45	0.35-1.25	5.5-19.5
Pr > F	0.0001	0.0015	0.0166	0.0001	

Values with the same letters are not statistically different at the 5% threshold (SNK). Axis-GU-n° = number of growth units per axis measured; GU-length = mean length of growth units in centimeters; GU-diam = mean diameter of growth units in centimeters; GU-phyto-n° = mean number of phytomers per growth unit; Min = minimum and Max = maximum.

from 0.32 to 3.11 cm (mean 1.05 ± 0.52 cm); and the number of phytomers carried by GUs in this cohort ranged from 4.5 to 28.75 (mean 15 ± 5.74). In adult *P. erinaceus* trees, the number of the GUs on the assessed axes ranged from 4 to 11 (average 7.63 ± 1.88); the length of the GUs in this cohort ranged from 12.35 to 45 cm (average 24.44 ± 7.67 cm); the diameter of the GUs ranged from 0.71 to 2.39 cm (average 1.25 ± 0.41 cm) and the number of phytomers counted per GU ranged from 9 to 29 (average 17.28 ± 3.89). In old trees of *P. erinaceus*, the number of the GUs present on the observed axis varied from 5 to 14 (average 9.22 ± 2.32); the length of the GUs varied from

10.05 to 36.83 cm (average 22.91 ± 7.49 cm); the diameter of the GUs varied from 0.6 to 2.27 cm (average 1.09 ± 0.42 cm); the number of phytomers carried by the GUs of this cohort varied from 12 to 31.75 (average 20.26 ± 6.09).

Influence of habitats on growth unit morphology

Variance analysis of morphological parameters evaluated according to habitat showed that the morphology of the growth units of axes in full sun and shade was statistically identical in *K. senegalensis* ($P > 0.05$) while only the number of growth units in the different axes differed ($P < 0.05$). The number of growth units was higher in axes growing in the shade than in full sun (table III). In *P. erinaceus*, the number of growth units per axis and the number of phytomers per growth unit differed from one environment to another ($P < 0.05$) and were higher in the shade (table III) whereas the length and diameter of the growth unit remained statistically unchanged whatever the environment considered ($P > 0.05$).

Influence of location on growth unit morphology

Comparison of the morphological dimensions of the growth units according to the vegetation and climatic gradient revealed highly significant differences ($P < 0.05$) between locations for each of the morphological parameters assessed, regardless of the species (table IV). The variation in these parameters neither increased nor decreased along the bioclimatic gradient and did not follow the order of the locations along the south-north gradient (table IV).

Influence of the tree development stage on the growth unit morphology of the individuals

Analysis of variance showed that in *K. senegalensis*, the length of the growth unit and the number of phytomers per growth unit differed according to the development stage ($P < 0.05$), while the number of growth units per axis and the mean diameter of the growth unit remained the same ($P > 0.05$). Indeed, the growth unit was longer in young individuals and shorter in adult and old individuals and the number of phytomers per growth unit increased from the youngest to the oldest individuals (table V). In *P. erinaceus*, most of the parameters evaluated did not vary from one development stage to another ($P > 0.05$), except the number of phytomers per growth unit, which increased from the youngest to the oldest individuals ($P < 0.05$).

Table V.
 Variation in morphological parameters of the growth unit according to the age category of the individuals (size).

Species	Age category	Axis-GU-n°	GU-length (cm)	GU-diam (cm)	GU-phyto-n°
<i>Khaya senegalensis</i>	Old-tree	8.25 ± 0.33a	18.02 ± 1.09b	1.37 ± 0.05a	19.77 ± 0.82a
	Min-Max	5-12	6.2-38.85	0.74-2.04	13-33
	Adult-tree	8.25 ± 0.43a	17.38 ± 1.42b	1.33 ± 0.08a	17.75 ± 1.01ab
	Min-Max	5-14	5.15-31.77	0.74-1.93	10.5-29.5
	Young-tree	7.95 ± 0.41a	23.45 ± 2.28a	1.34 ± 0.06a	16.31 ± 0.64b
	Min-Max	2-21	5.8-67.8	0.41-3.81	7-38
	Pr > F	0.8700	0.0213	0.9463	0.0103
<i>Pterocarpus erinaceus</i>	Old-tree	9.22 ± 0.54a	22.9 ± 1.76a	1.09 ± 0.09a	20.26 ± 1.43a
	Min-Max	5-14	10.05-36.83	0.6-2.27	12-31.75
	Adult-tree	7.63 ± 0.34a	24.44 ± 1.4a	1.25 ± 0.07a	17.28 ± 0.71b
	Min-Max	4-11	12.35-45	0.71-2.39	9-29
	Young-tree	7.94 ± 0.47a	21.66 ± 1.06a	1.16 ± 0.12a	14.99 ± 0.62c
	Min-Max	2-19	6.55-62.4	0.32-10.51	4.5-28.75
	Pr > F	0.3324	0.3520	0.8528	0.0007

Values with the same letters are not statistically different at the 5% threshold (SNK). Axis-GU-n° = number of growth units per axis measured; GU-length = mean length of growth units in centimeters; GU-diam = mean diameter of growth units in centimeters; GU-phyto-n° = mean number of phytomers per growth unit; Min = minimum and Max = maximum.

Influence of the season on growth unit morphology

In *K. senegalensis*, comparison of the morphological dimensions of the growth units according to the season revealed a significant difference between the rainy (optimal) and dry (constraining) seasons both in the length of the growth units and in the number of phytomers per growth unit ($P < 0.05$). The average diameter of the growth unit remained the same from one season to another ($P > 0.05$), whereas the growth units were longer and the number of phytomers per growth unit higher in the rainy season (table VI). In *P. erinaceus*, analysis of variance (table VI) revealed no significant difference between the rainy and dry seasons in all the morphological parameters assessed along the axes ($P > 0.05$).

Variation in growth unit morphology between target species

Table VII shows there was no significant difference between the two species in any of the morphological dimensions we measured ($P > 0.05$). All the morphological parameters of the axis-bearing growth units in *K. senegalensis* and *P. erinaceus* were almost identical ($P > 0.05$).

Figures 4 and 5 shows an average distribution pattern of the number of phytomer per growth unit and of the growth stops or limits (GS) of the growth unit along an axis in the two species studied. The growth stop zones are generally marked by small leaves or leaf scales or by successive very short internodes often identical in length.

Discussion

The forms of plant growth have been the subject of many studies, but are still poorly defined and continually questioned because of the inconsistency and heterogeneity of the different methods used to analyze them. The sustainable management of plant genetic resources must take into account all possible aspects of methodological approaches including architectural concepts (retrospective analysis) and the phenological cycle of trees. This study dealt with the effect of different factors, i.e. the type of light type (full sunlight and

Table VI.
 Comparison of morphological parameters of the growth units according to the season.

Species	Season	Axis-GU-n°	GU-length (cm)	GU-diam (cm)	GU-phyto-n°
<i>Khaya senegalensis</i>	Dry season	7.73 ± 0.34a	18.12 ± 2.78b	1.34 ± 0.07a	16.36 ± 0.83b
	Min-Max	5-17	5.15-67.8	0.7-3.81	7-38
	Rainy season	8.4 ± 0.41a	24.46 ± 0.76a	1.34 ± 0.05a	18.34 ± 0.47a
	Min-Max	2-21	9.97-46.07	0.4-2.88	8.25-26.75
	Pr > F	0.2227	0.0028	0.8883	0.0388
<i>Pterocarpus erinaceus</i>	Dry- season	8.06 ± 0.5a	22.43 ± 0.87a	1.05 ± 0.15a	15.78 ± 0.68a
	Min-Max	3-19	6.55-44.40	0.32-2.53	4.5-31.5
	Rainy- season	8.08 ± 0.41a	22.47 ± 1.32a	1.29 ± 0.05a	16.64 ± 0.72a
	Min-Max	2-21	9.53-62.4	0.41-3.11	5.5-31.75
	Pr > F	0.9617	0.9772	0.1525	0.3843

Values with the same letters are not statistically different at the 5% threshold (SNK). Axis-GU-n° = number of growth units per axis measured; GU-length = mean length of growth units in centimeters; GU-diam = mean diameter of growth units in centimeters; GU-phyto-n° = mean number of phytomers per growth unit; Min = minimum and Max = maximum.

Table VII.
Comparison of growth unit morphology between target species.

Species	Axis-GU-n°	GU-length (cm)	GU-diam (cm)	GU-phyto-n°
<i>Khaya senegalensis</i>	8.06 ± 0.27a	21.265 ± 1.47a	1.35 ± 0.04a	17.35 ± 0.48a
Min-Max	2-21	5.15-67.8	0.4-3.81	7-38
<i>Pterocarpus erinaceus</i>	8.04 ± 0.32a	22.45 ± 0.79a	1.1 ± 0.08a	16.22 ± 0.49a
Min-Max	2-19	6.55-62.4	0.32-3.11	4.5-31.75
Pr > F	0.9587	0.9997	0.0595	0.1009

Values with the same letters are not statistically different at the 5% threshold (SNK). Axis-GU-n° = number of growth units per axis measured; GU-length = mean length of growth units in centimeters; GU-diam = mean diameter of growth units in centimeters; GU-phyto-n° = mean number of phytomers per growth unit; Min = minimum and Max = maximum.

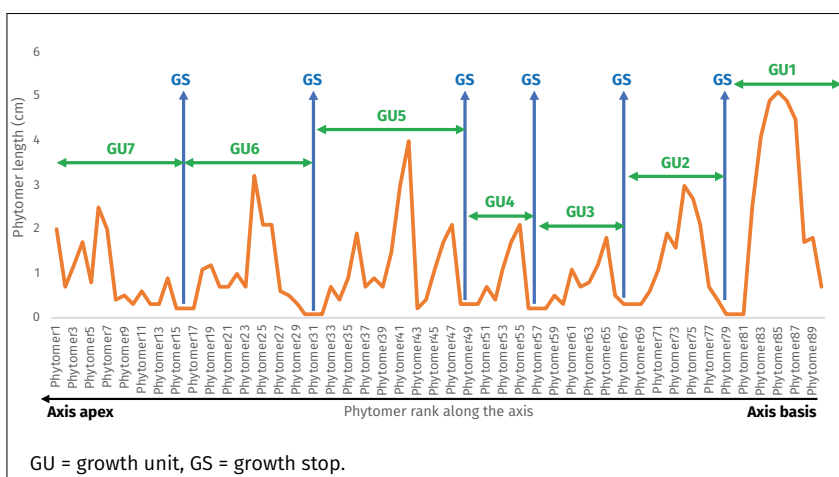


Figure 4.
Variation in the size and number of phytomers per growth unit along the axes observed in *Khaya senegalensis*.

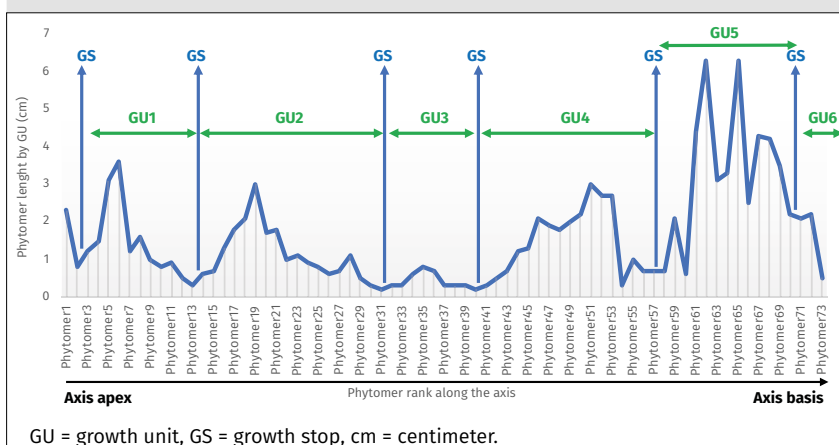


Figure 5.
Variation in the size and number of phytomers per unit of growth along a *Pterocarpus erinaceus* axis.

shade) in different locations along a gradient of climate; the age of individuals; and the seasonality (rainy vs dry season) on the growth unit morphology of the different types of axes in *K. senegalensis* and *P. erinaceus* in Côte d'Ivoire.

Morphology of growth units

Our results showed that whatever the species, growth stops are represented by very short successive internodes. The same observations have been made in many species in Europe and Latin America (Barthélémy and Caraglio, 2007), notably in Beech (*Fagus sylvatica* L.) (Nicolini, 2000), in Jacquot wood (*Laetia procera*) and Angelica (*Dicorynia guianensis*) (Heuret *et al.*, 2003), in Walnut (*Juglans regia* L.) (Sabatier *et al.*, 1998), in *Cedrus atlantica* (Sabatier and Barthélémy, 1999), in *Fagus sylvatica* (Nicolini and Caraglio, 1994), in *Parkia velutina* (Nicolini *et al.*, 2012). The shape of the growth units depends on the optimal growth conditions of the species driven by the functioning of the terminal meristems. If the growth conditions are limiting (lack of water, crowded environment, etc.), the growth units will be lean (short with a small diameter and many very short internodes per growth unit), in contrast to those in a favourable environment (long growth units, large diameter and a small number of very long internodes per growth unit). The morphology of the growth units is thus an indicator of environmental conditions.

Influence of habitats

Specifically, the number of growth units per axis and the number of phytomers per growth unit were high, and growth unit were shorter in the shade (individuals growing in undergrowth) than in individuals growing in full sun in both species. This means that the shady environment (undergrowth) is less favourable for the optimal development of the species. Indeed, when conditions are optimal, shoot development is harmonious, and continuous, with fewer large organs. Full sunlight favours the optimal development of the individuals and should be preferred for planting establishment. The crown diameter of the individuals developing in open environments in both species was wider and well-rounded with large oblique branches made up of leaves at the end and openings in the crown allowing sunlight to pass through. On the other hand, the trees developing in shady environments or in undergrowth had tapering, tufty crowns and vertical branches reaching for the light of the canopy. These results have also been reported in sev-

eral studies (Nicolini and Caraglio, 1994; Tousignant and Delorme, 2006; Abidi, 2012; Calonnec, 2013). The individuals developed a large number of growth stops and phytomers per growth unit. These observations show that it is difficult to develop in undergrowth. Moreover, in these conditions the individuals are subject to possible attacks by various insect species. The more repetitive the stoppages along the axis, the less likely the plant to survive. In these cases, individuals struggle to develop and produce reliable reproductive entities. On the other hand, when there are few growth stops along an axis, this indicates harmonious development and successful growth. For this reason, the undergrowth habitat cannot be recommended for optimising the success of cultivation with these species.

The analyses of variance used show that, overall, the environment (full sun and undergrowth) in which the trees of both species grow does not seem to affect all the morphological parameters assessed ($P > 0.05$). Only the number of growth units per axis was significantly influenced by the habitat in the two species ($P < 0.05$). As well as the number of phytomers per growth unit in *P. erinaceus* ($P < 0.05$). Normally, the type of light would be expected to have a significant effect on the morphology of the growth units. This is certainly due to the fact that the light available in the undergrowth was favourable and tolerable for the development of the species' shoots, and could also be due to the genetic programme of architectural development that was properly expressed by each species. According to Hallé and Keller (2019), architecture is the expression of the genetic programme of plant growth and development visible to the naked eye.

Influence of location

Analysis of the variance of the morphological parameters evaluated as a function of the location along a south-north vegetation and climate gradient revealed that location had a significant influence on the morphology of the growth units of the two-target species ($P < 0.05$). In fact, even if the locations surveyed were chosen along a decreasing gradient of vegetation density, each location has its own characteristics (climate, soil type, rainfall, relative humidity, etc.) that distinguishes it from the others. In addition, in the current context of climate change, the climatic and micro-climatic parameters are very unstable, uncontrolled and show high daily variations. Sabatier (1999), Lauri *et al.* (2010) and Calonnec (2013) showed that the depth and fertility of the soil, the environment and the age of the individuals can influence the architectural development of a species. Maranz and Wiesman (2003), and Soloviev *et al.* (2004) also reported that climate or an ecological gradient had an effect on plant morphology. Similarly, Salazar and Quesada (1987) then Assogbadjo *et al.* (2006) reported that the origin of differences in tree morphology lies in factors such as soil type and the genetic characteristics of the sampled individuals.

In *K. senegalensis*, the lengths and diameters of the growth units were maximum in Bouaké. The environment in Bouaké could thus favour shoot development and improve the success of a forest management programme targeting

this species. In *P. erinaceus*, large shoot sizes were obtained in Toumodi and Bouaké (i.e. in centre of the country), where locations are favourable for the successful establishment of *P. erinaceus* plantings.

Influence of the age of the individuals sampled (size of the individuals)

Our study showed that the majority of morphological dimensions differed in young, adult and old individuals of *K. senegalensis* ($P < 0.05$). Indeed, the plant function capacities (strength, adaptation and photosynthesis) for the establishment of organs differed depending on the age of the individual, and this also influenced the dimensions of the plant organs, whereas in the species *P. erinaceus*, only the number of phytomers per growth unit was influenced by the age of the individual ($P < 0.05$). Growth of *P. erinaceus* was very slow compared to that of *K. senegalensis*; in the former, the shoots of the crowns are synchronous and take time to develop whatever the growth stage. This gives the impression that the shoots of young and old individual have the same morphology. However, the difference in the number of phytomers per growth unit in each age category showed that adult and old individuals were better developed than younger ones. Indeed, even though some studies have shown that the age of individuals influences tree morphology (Sabatier, 1999; Assogbadjo *et al.*, 2006; Lauri *et al.*, 2010); it should be noted that the crown setting of trees and the organogenesis of macro-anatomical markers of a species is intrinsic to the genome of a plant (Hallé and Keller, 2019). Whatever the age of the plant, the expression or architectural development of a species may be plastic, but remains the same. In some cases, architecture can be influenced by environmental conditions, but this influence remains limited because, regardless of age, the majority of species follow their architectural programme and return to their original architectural development sequence.

In *K. senegalensis*, the growth units were longer in small (young) individuals with fewer internodes per growth unit, meaning that individuals develop most when young. Young individuals (cuttings) would be ideal for the selection of suitable genotypes for a natural or artificial forest regeneration programme based on this species, unlike *P. erinaceus*, in which selection could be conducted at all levels or in all age categories. In fact, the development of shoots of *P. erinaceus* is identical from one age to another, except for the number of phytomers per growth unit, which increases from the youngest to the oldest.

Influence of the season

In *K. senegalensis*, the season influenced the morphological development of the growth units, whereas the season had no influence in *P. erinaceus*. In *K. senegalensis*, in the rainy season, the length and number of phytomers per growth unit were greater than in the dry season. This is very logical since water is essential for plant growth and development. Water guarantees the physiological development and harmonious functioning (metabolism, photosynthesis,

organogenesis, etc.) of all living beings, especially plants, while water stress slows down all physiological activity up to withering.

The rainy season is thus the most favourable period to establish agroforestry and reforestation programmes based on these species and to increase their survival rate after transplanting in Côte d'Ivoire.

Comparison of target species according to growth unit morphology

Our observations showed that *K. senegalensis* and *P. erinaceus* have practically identical growth unit morphologies. Even if the two species belong to different families (*K. senegalensis* to Meliaceae and *P. erinaceus* to Fabaceae), their architecture could be almost the same (Hallé and Keller, 2019), which we intend to verify in a future study (architectural development of the two-target species). In their study, Hallé and Keller (2019) indicated that most species in the Meliaceae family follow Werner Rauh's model of architectural development, as confirmed by our field observations in *K. senegalensis*. The same authors also showed that the majority but not all species belonging to three legume sub-families (Fabaceae, Caesalpiniaceae and Mimosaceae), particularly Fabaceae, follow Wilhelm Troll's model. However, we believe that *P. erinaceus* architectural model is more similar to the model of Paul Champagnat, as the species is a reiterated complex of unbranched axes and discrete branching with short branches. The axes are vertical at their base while their distal end represents a curve with a large radius, brought back to the horizontal or collapsed due to the gravity and flexibility of the wood. The leaves are spirally arranged while inflorescences can be either lateral or terminal like in *Parkia biglobosa*. This hypothesis will be tested in further studies.

Conclusions

This study allowed us to observe and identify a number of factors that influence the morphology of crown growth units in *Pterocarpus erinaceus* Poir. and *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. which are necessary for their sustainable management. Our results show that growth unit morphology is an indicator of the best environmental or climate conditions for growth. Different light conditions (full sunlight or shade) did not significantly alter the morphology of the growth units in either species, but full sunlight enabled good general development of the growth units, showing that full sunlight is favourable for plot establishment. The size of the growth units varied significantly from one location to another due to different environmental characteristics (microclimate, soil type, rainfall, etc.); the shoots were well developed in the southern part of the climate gradient selected for this study (central part of Côte d'Ivoire: Toumodi and Bouaké). This zone is more favourable for these two species and should be chosen over other possible zones for a reforestation program. The age of the individuals was seen to influence the number of phytomeres per growth unit. Young individuals (cuttings) are ideal for the selection

of adapted and resilient genotypes due to the ability of their shoots to regenerate rapidly under optimal conditions (immediate synchronization). The size of the *K. senegalensis* growth units increased significantly in the rainy season. In contrast, the season had no significant effect on the size of the growth units in *P. erinaceus*. The growth units of *K. senegalensis* had almost the same dimensions as those of *P. erinaceus*, the two species may thus have identical architectural characteristics. This hypothesis will be tested in a comparative architectural study, as such information is important to complete the data required for the establishment of forest plantings under ongoing climate change. Our results contribute to understanding the functioning of the crown and the adaptation of the two species to global climate change and could guide the choice of environments and seasons for the implementation of reforestation or agroforestry programs based on these two species.

Acknowledgements

The authors are grateful to the *Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement* (CIRAD) for providing the technical equipment required to conduct the study.

Funding

This study was financed by the Ministry of Higher Education and Scientific Research of Côte d'Ivoire, the French Development Agency and IRD (*Institut de Recherche pour le Développement*) in the framework of PRESeD-CI 2 (Renewed Partnership for Research for Development in Côte d'Ivoire) and C2D (Debt Reduction Contract) of the AMRUGE-CI project (Support for the Modernization and Reform of Universities and *Grandes Écoles* of Côte d'Ivoire).

Data availability

The datasets generated during and/or analyzed in the current study are available on: Adji, Beda Innocent, 2022, "Growth unit morphology and biomass in *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. (Meliaceae), *Pterocarpus erinaceus* Poir. (Fabaceae) and *Parkia biglobosa* (Fabaceae) according to habitat and climate in Côte d'Ivoire", <https://doi.org/10.7910/DVN/I37ABC>, Harvard Dataverse, V1.

References

- Abidi F., 2012. Effets de la qualité de la lumière sur l'élaboration de l'architecture du rosier buisson. Thèse de doctorat, Université de Tunis El Manar, Tunisie, 277 p. <https://theses.hal.science/tel-00871779>
- Adji B. I., Akaffou S. D., Kouassi K. H., Houphouet Y. P., Duminiel J., Sabatier S., 2020. Influence of different environments on germination parameters and seedling morphology in *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss (Meliaceae). *American Journal of Plant Sciences*, 11: 1579-1600. <https://doi.org/10.4236/ajps.2020.1110114>

- Adji B. I., Akaffou S. D., Kouassi K. H., Houphouet Y. P., Duminil J., Sabatier S., 2021a. The Effect of four abiotic factors on macro-anatomical markers development in *Parkia biglobosa*, Jack, R. Br., 1830 (Fabaceae) crown. American Journal of Plant Sciences, 12: 645-661. <https://doi.org/10.4236/ajps.2021.124044>
- Adji B. I., Akaffou S. D., Kouassi K. H., Houphouet Y. P., Duminil J., Sabatier S., 2021b. Bioclimate influence on seed germination and seedling morphology parameters in *Pterocarpus erinaceus* Poir., 1804 (Fabaceae). International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology, 6 (3): 2456-1878. <https://dx.doi.org/10.22161/ijeab.63.1>
- Adji B. I., Akaffou S. D., Kouassi K. H., Houphouet Y. P., Dereffye P., Duminil J., Jaeger M., Sabatier S., 2021c. Allometric models for non-destructive estimation of dry biomass and leaf area in *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss., 1830 (Meliaceae), *Pterocarpus erinaceus* Poir., 1804 (Fabaceae) and *Parkia biglobosa* (Jacq.) R. Br., 1830 (Fabaceae). Trees, 35 (6): 1905-1920. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02159-y>
- Akaffou S. D., Kouamé K. A., Gore B. B. N., Abessika Y. G., Kouassi K. H., Hamon P., et al., 2019. Effect of the seeds provenance and treatment on the germination rate and plants growth of four forest trees species of Côte d'Ivoire. Journal of Forestry Research, 73: 87-90. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01064-y>
- Ake-Assi L., 1999. Effets de l'exploitation forestière sur la conservation de la diversité biologique en Afrique de l'Ouest : le cas de la Côte d'Ivoire. In : Ouédraogo A. S., Boffa J.-M. (éds). Vers une approche régionale des ressources génétiques en Afrique sub-saharienne. Actes du premier atelier régional de formation sur la conservation et l'utilisation durable des ressources génétiques forestières en Afrique de l'Ouest, Afrique Centrale et Madagascar. Mars 1998. Ouagadougou, Burkina Faso, CNSF/IPGRI, 101-106.
- Assogbadjo A. E., Kynd T., Sinsin B., Gheysen G., Van Damme P., 2006. Patterns of genetic and morphometric diversity in Baobab (*Adansonia digitata* L.) populations across different climatic zones of Benin (West Africa). Annals of Botany, 97: 819-830. <https://doi.org/10.1093/aob/mcl043>
- Barthélémy D., Caraglio Y., 2007. Plant architecture: a dynamic, multilevel and comprehensive approach to plant form, structure and ontogeny. Annals of Botany, 99: 375-407. <https://doi.org/10.1093/aob/mcl260>
- Calonnec A., 2013. Façonner l'architecture végétale pour contrôler les maladies des plantes. BIOFUTUR, 343 : 37-42.
- Chaubert-Pereira F., Caraglio Y., Lavergne C., Guédon Y., 2009. Identifying ontogenetic, environmental and individual components of forest tree growth. Annals of Botany, 104: 883-896. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01197503>
- CITES, 2016. Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction – Notification of the Parties N° 2016/008. CITES, UNEP, 1 p. <https://cites.org/sites/default/files/notif/F-Notif-2016-008.pdf>
- Dumenu W. K., 2019. Assessing the impact of felling/export ban and CITES designation on exploitation of African rosewood (*Pterocarpus erinaceus*). Biological Conservation, 236: 124-133. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.05.044>
- Goba A. E., Koffi G., Raoul S. S., Leonie C. K., Yeboa A. K., 2019. Structure démographique et régénération naturelle des peuplements naturels de *Pterocarpus erinaceus* Poir. (Fabaceae) des savanes de Côte d'Ivoire. Bois et Forêts des Tropiques, 341 (3) : 5-14. <https://doi.org/10.19182/bft2019.341.a31750>
- Godin C., Caraglio Y., 1998. A multiscale model of plant topological structures. Journal of Theoretical Biology, 191: 1-46. <https://doi.org/10.1006/jtbi.1997.0561>
- Hallé F., Keller R., 2019. Mais d'où viennent les plantes ? Arles, France, Actes Sud, 179 p.
- Hallé F., Oldeman R. A. A., Tomlinson P. B., 1978. Tropical trees and forests: an architectural analysis. Berlin, Germany, Springer-Verlag, 34 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-81190-6>
- Hallé F., Martin R., 1968. Étude de la croissance rythmique chez l'Hévéa (*Hevea brasiliensis* Mull. Arg.). Adansonia, Bulletin du Muséum national d'Histoire naturelle, Série 2, 8 (4) : 475-503.
- Heuret P., Nicolini E., Edelin C., Roggy J.-C., 2003. Approche architecturale pour l'étude des arbres de forêt tropicale humide guyanaise. Revue Forestière Française, 55 : 158-178. http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/2042/5783/2/340_350.pdf.txt
- Issa I., Wala K., Dourma M., Atakpama W., Kanda M., Akpagan K., 2017. Valeur ethno-botanique de l'espèce *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. (Meliaceae) auprès des populations riveraines de la chaîne de l'Atacora au Togo. Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires, 6 : 64-72.
- Kouassi K. C., Adji B. I., Traoré K., 2019. Floristic diversity of a Voluntary Natural Reserve (VNR) of Sucrivoire on the right bank of the Bandama river in Zuenoula, in the West Centre of Côte d'Ivoire. International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology, 4 (4): 909-918. <http://dx.doi.org/10.22161/ijeab.444>
- Kushwaha C. P., Tripathi S. K., Singh G. S., Singh K., 2010. Diversity of deciduousness and phenological traits of key Indian dry tropical forest trees. Annals of Forest Science, 67 (3): 310. <https://doi.org/10.1051/forest/2009116>
- Lauri P. E., Kelner J. J., Trottier J. C., Costes E., 2010. Insights into secondary growth in perennial plants: its unequal spatial and temporal dynamics in the apple (*Malus domestica*) is driven by architectural position and fruit load. Annals of Botany, 105: 607-616. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq006>
- Maranz S., Wiesman Z., 2003. Evidence for indigenous selection and distribution of the shea tree, *Vitellaria paradoxa*, and its potential significance to prevailing parkland savanna tree patterns in sub-Saharan Africa north of the equator. Journal of Global Biogeography, 30: 1505-1516. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2003.00892.x>
- Millan M., 2016. Analyse de la variabilité des traits architecturaux des formes de croissance dans les communautés végétales. Thèse de doctorat, botanique, Université de Montpellier, France, 178 p. <https://theses.hal.science/tel-02489116>
- Nicolini E., 2000. Nouvelles observations sur la morphologie des unités de croissance du hêtre (*Fagus sylvatica* L.). Symétrie des pousses, reflet de la vigueur des arbres. Canadian Journal of Botany, 78 : 77-87. <https://doi.org/10.1139/b99-162>
- Nicolini E., Caraglio Y., 1994. L'influence de divers caractères architecturaux sur l'apparition de la fourche chez le *Fagus sylvatica*, en fonction de l'absence ou de la présence d'un couvert. Canadian Journal of Botany, 72 : 1723-1734. <https://doi.org/10.1139/b94-213>

Nicolini E., Beauchêne J., Leudet., De la Vallée B., Ruelle J., Mangenet T., et al., 2012. Dating branch growth units in a tropical tree using morphological and anatomical markers: the case of *Parkia velutina* Benoist (Mimosoïdeae). *Annals of Forest Science*, 69: 543-555. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0172-1>

REDD+, 2017. Stratégie nationale REDD+, Côte d'Ivoire. 121 p. <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/lvc186335.pdf>

REDD+, 2020. Programme de réduction des émissions autour du Parc national de Taï. Secrétariat exécutif permanent REDD+ Côte d'Ivoire, 47 p.

Rutishauser E., Barthélémy D., Blanc L., Nicolini E., 2011. Crown fragmentation assessment in tropical trees: Method, insights and perspectives. *Forest Ecology and Management*, 261 (3): 400-407. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.10.025>

Sabatier S., Caraglio Y., Drénou C., 2014. L'architecture des arbres au service des forestiers. *Innovations Agronomiques*, 41 : 119-128. <https://www.researchgate.net/publication/303932946>

Sabatier S., 1999. Variabilité morphologique et architecturale de deux espèces de noyers : *Juglans regia* L., *Juglans nigra* L. et deux noyers hybrides interspécifiques. Thèse de doctorat, biologie végétale, Université de Montpellier II, France, 143 p. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00106305>

Sabatier S., Barthélémy D., 1999. Growth dynamics and morphology of annual shoots according to their architectural position in young *Cedrus atlantica* (Endl.) Manetti ex Carrière (Pinaceae). *Annals of Botany*, 84: 387-392. <https://doi.org/10.1006/anbo.1999.0939>

Sabatier S., Barthélémy D., Ducouso I., Germain E., 1998. Modalités d'allongement et morphologie des pousses annuelles chez le noyer commun, *Juglans regia* L. 'Lara' (Juglandaceae). *Canadian Journal of Botany*, 76 : 1253-1264. <https://doi.org/10.1139/b98-055>

Salazar R., Quesada M., 1987. Provenance variation in *Guzuma ulmifolia* L. in Costa Rica. *Commonwealth Forestry Review*, 66: 317-324.

Segla K. N., Adjonou K., Rabiou H., Bationo B. A., Mahamane A., Guibal D., et al., 2020. Relations between the ecological conditions and the properties of *Pterocarpus erinaceus* Poir. wood from the Guinean-Sudanian and Sahelian zones of West Africa. *Holzforschung*, 74 (11): 999-1009. <https://doi.org/10.1515/hf-2019-0250>

Soloviev P., Niang T. D., Gaye A., Totte A., 2004. Variabilité des caractères physicochimiques des fruits de trois espèces ligneuses de cueillette, récoltés au Sénégal, *Adansonia digitata*, *Balanites aegyptiaca* et *Tamarindus indica*. *Fruits*, 59 : 109-119. <https://doi.org/10.1051/fruits:2004011>

Taugourdeau O., Chaubert-Pereira F., Sabatier S., Guédon Y., 2011. Deciphering the developmental plasticity of walnut saplings in relation to climatic factors and light environment. *Journal of Experimental Botany*, 62 (15): 5283-5296. <https://doi.org/10.1093/jxb/err115>

Thiébaud B., 1982. Observations sur le développement de plantules de hêtre (*Fagus sylvatica*) cultivés en pépinières, orthotropie et plagiotropie. *Canadian Journal of Botany*, 60: 1292-1303. <https://doi.org/10.1139/b82-165>

Tousignant M.-E., Delorme M., 2006. Connaître le fonctionnement de la plante pour mieux gérer son environnement. Article paru dans Québec Vert (IQDHO). Adapté de : Understanding Plant Growth: A Review of the Basics, conférence

présentée lors de l'Ohio International Short Course 2005 par Paul A. Thomas et Bodie V. Pennisi, de l'Université de Georgie, et bonifié par l'équipe de l'IQDHO. Québec Vert, 3 p. https://www.agrireseau.net/horticulture-serre/documents/07%20QVS%20fonctionnement%20_06_.pdf

Adji et al. – Author's contributions

Contributor role	Contributor names
Conceptualization	B. I. Adji
Data Management	B. I. Adji
Formal Analysis	B. I. Adji
Acquisition of funding	D. S. Akaffou, S. Sabatier
Survey and Investigation	B. I. Adji
Methodology	B. I. Adji
Project management	D. S. Akaffou, S. Sabatier
Resources	B. I. Adji, D. S. Akaffou, S. Sabatier
Software	B. I. Adji
Supervision	D. S. Akaffou, S. Sabatier
Validation	D. S. Akaffou, S. Sabatier
Visualization	D. S. Akaffou, S. Sabatier
Writing – Preparing the original draft	B. I. Adji
Writing – Reviewing and editing	B. I. Adji, D. S. Akaffou, S. Sabatier

Bois et Forêts des Tropiques - Revue scientifique du Cirad -
 © Bois et Forêts des Tropiques © Cirad



Cirad - Campus international de Baillarguet,
 34398 Montpellier Cedex 5, France
 Contact : bft@cirad.fr - ISSN : L-0006-579X

ACTES DE CONFERENCE : COMMUNICATIONS
ORALES, SEMINAIRES, COLLOQUES ET
FORMATIONS EFFECTUES

SEMINAIRE 1

Beda Innocent Adji, Doffou Sélastique Akaffou, Sylvie Sabatier, Marc Jaeger, Philippe De Reffye, Yves Caraglio, Kouadio Henri Kouassi and Jérôme Duminil. **2020**.

ARCHITECTURE AND GROWTH MODELLING OF SAVANNAH AGROFORESTRY SPECIES NATIVE TO COTE D'IVOIRE. *AMAPhD 2020*, NOV 2020, *MONTPELLIER, FRANCE*. <https://hal.inrae.fr/hal-03033726>

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/348201736>

Adji AMAPHD2020

Conference Paper · January 2021

CITATIONS

0

READS

30

1 author:



Beda Innocent Adji

Université Jean Lorougnon Guédé

20 PUBLICATIONS 11 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



AGROFORESTERIE CACAOYER [View project](#)



Intégration de trois essences forestières indigènes dans les systèmes agroforestiers pour l'amélioration des conditions de vie des populations locales et le maintien de la biodiversité [View project](#)

Architecture and growth modelling of savannah agroforestry species native to Côte d'Ivoire

Beda Innocent Adji

► **To cite this version:**

Beda Innocent Adji. Architecture and growth modelling of savannah agroforestry species native to Côte d'Ivoire. AMAPhD 2020, Nov 2020, Montpellier, France. hal-03033726

HAL Id: hal-03033726

<https://hal.inrae.fr/hal-03033726>

Submitted on 3 Dec 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Architecture and growth modelling of savannah agroforestry species native to Côte d'Ivoire

Presenter: Beda Innocent ADJI
Email: adjibedainnocent@gmail.com
Scientist Supervisor: D. Sélastique AKAFFOU; Sylvie SABATIER; Marc JAEGER; Philippe DEREFFYE; Yves CARAGLIO; Henri KOUASSI & Jérôme DUMINIL

Reforestation and agroforestry are the two options favoured by Côte d'Ivoire to restore its forest area and conserve its wood resources. *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* and *Parkia biglobosa* are three indigenous savannah forest species with multiple uses. The heavy exploitation of these species exposes them to a loss of diversity that could lead to their eventual extinction. Integrating them into agroforestry programmes is a solution for their conservation and sustainable use. This study is being conducted with the aim of optimising the cultivation of these three species and promoting their agroforestry potential. Architectural analysis (development sequence and morphology of growth units/module) from seedlings to old trees will be carried out. The work will take place along a South-North drought gradient in Côte d'Ivoire in order to understand and determine the intra-specific architectural variability. In a second step, a retrospective analysis of growth will allow the past growth of the trees to be traced using morphological markers left behind by growth stoppages due to dry seasons. In this way, the architectural diagram of each of these species will be established. Finally, organ measurements captured in Multiscale Trees Graph format and analysis of the tops of the three species will be carried out at different ages in the nursery. These measurements will be used to model the growth and development of the target species using the GreenLab structure-function model. Hidden parameters such as organ source-sink relationships, leaf resistance, common pool and production area will be obtained. These data will guide the choice of progeny or plants for planting, the ideal planting density, the itinerary and cultivation management of these three species.

Keywords: Côte d'Ivoire, *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* et *Parkia biglobosa*, Architecture, modelling.

COMMUNICATION 1

Beda Innocent Adji, Doffou Sélastique Akaffou, Sylvie Sabatier, Philippe De Reffye, Marc Jaeger and Jérôme Duminil. **2021**.

ARCHITECTURE AND STRUCTURE-FUNCTION MODELLING OF NATIVE SAVANNAH AGROFORESTRY SPECIES IN COTE D'IVOIRE. *IRD-PhDays 2021, MAI 2021, MONTPELLIER, FRANCE.*

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/359816631>

Architecture and structure–function modelling of native savannah agroforestry species in Côte d'Ivoire

Conference Paper · November 2021

CITATIONS

0

READS

15

5 authors, including:



Beda Innocent Adji

Université Jean Lorougnon Guédé

20 PUBLICATIONS 11 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Sélastique Akaffou

Université Jean Lorougnon Guédé

83 PUBLICATIONS 500 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Sylvie Sabatier

Cirad - La recherche agronomique pour le développement

85 PUBLICATIONS 716 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Marc Jaeger

Cirad - La recherche agronomique pour le développement

118 PUBLICATIONS 1,661 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



[MAGENA View project](#)



[Above and below-ground relationships in hybrid walnut growing in agroforests along a climatic gradient View project](#)

Architecture and structure-function modelling of native savannah agroforestry species in Côte d'Ivoire.

Presenter: Beda Innocent ADJI

Email: adjibedainnocent@gmail.com

Scientific Supervisors: Doffou Sélastique AKAFFOU, Sylvie Annabel, SABATIER, Philippe De REFFYE, Marc JAEGER

Abstract

In Côte d'Ivoire, biodiversity is threatened by deforestation, which has spread to the savannah areas. Reforestation and agroforestry based on local species are the two solutions chosen by Côte d'Ivoire to cushion and mitigate the negative consequences of this phenomenon. *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* and *Parkia biglobosa* are three indigenous savannah species that are overexploited and threatened by rural populations for their multiple uses. Their integration into reforestation and agroforestry programmes is a solution for their conservation and sustainable use. The objective of this study is to understand the functioning of the three species and to optimise their cultivation in Côte d'Ivoire. Therefore, a series of germination tests were undertaken in different environments in order to evaluate their adaptability and their potential for sexual reproduction. An architectural study from seedling to adult tree was carried out along an ecological gradient in order to determine the architectural development sequence of three species and to identify priority areas suitable for the establishment of permanent plots. Finally, the collection of dimensions and biomass of phytomers and growth units of individuals aged 6, 12 and 24 months in the Multiscale Trees Graph format in the nursery allowed the modelling of meristem function, development and growth of the target species. The results showed that the dendrometric characteristics of the seeders are negligible criteria for sexual regeneration ($P > 0.05$). Maternal environment and seed size are important selection tools and criteria for obtaining good germination and vigorous seedlings ($p < 0.05$). *Khaya senegalensis* is a 5-order branching tree with 4 axis categories and follows Rauh's architectural model. *Pterocarpus erinaceus* and *Parkia biglobosa* have up to 6 orders of branching due to several reiterated sympodial structures forming arches and 3 axis categories. *Pterocarpus erinaceus* follows the architectural pattern of Troll while *Parkia biglobosa* follows the pattern of Champagnat in young stage and Troll in adult stage. The level of organisation of the three species is 5: the phytomer, the growth unit or module, the axis, the architectural unit and the whole tree (repeated complex). The morphology of the growth units indicated difficulties in the development of species in the north of selected gradient (Ferké, Korhogo and Niakara) and favourable and priority areas for the implementation of reforestation and agroforestry programmes in the south of gradient (Daloa, Toumodi, Bouaké and Katiola). Modelling of meristem function showed that the distribution of phytomers within growth units and the distribution of growth units along the axis are fit to an approximate fish law with a positive binomial (preformed part) and a negative binomial (neoformed part). The results showed that the topological development parameters (chronological age: N , branching probability: A , stem development probability: P , stem Bernoulli: $P = 1 - v/m$, branch development probability: B , rhythm report: W and phyllochrone) are higher in humid zone (Daloa) than in dry zone (Korhogo). These results lead to a computational plant model of the three species adapted to needs of agroforestry from a new angle in Côte d'Ivoire and to new agronomic and forestry applications.

Keywords: Côte d'Ivoire, *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus*, *Parkia biglobosa*, architecture, modelling.

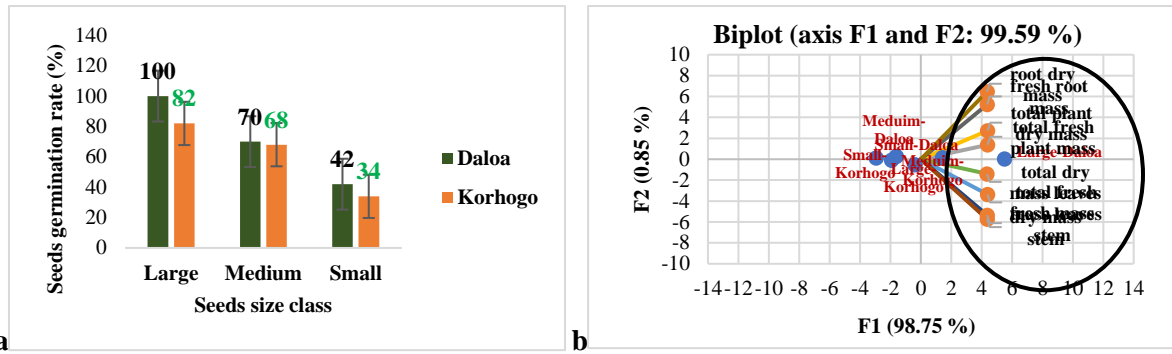


Fig 1. Study site and seed size influence on germination (a) and seedling growth (b)

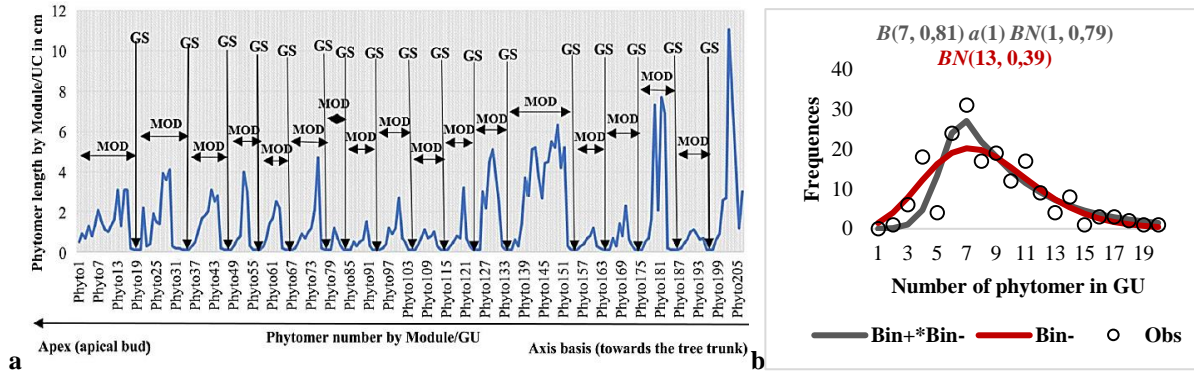


Fig 2. Variation of growth units along the axis (a) and their fit to the binomial distribution (b)

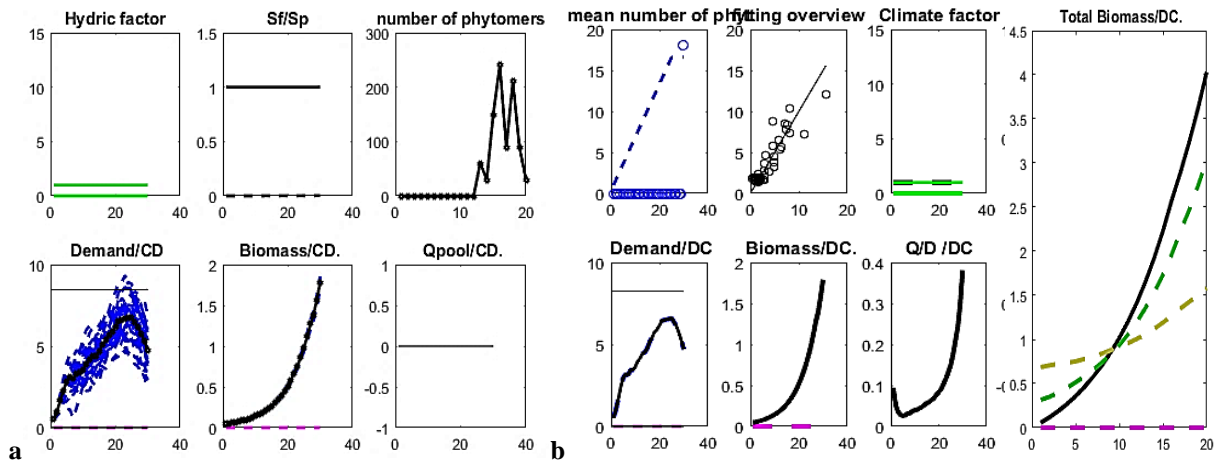


Fig 3. Source-sink organ relationship in 6-month-old plants in Dalao (a) and Korhogo (b) in *P. erinaceus*

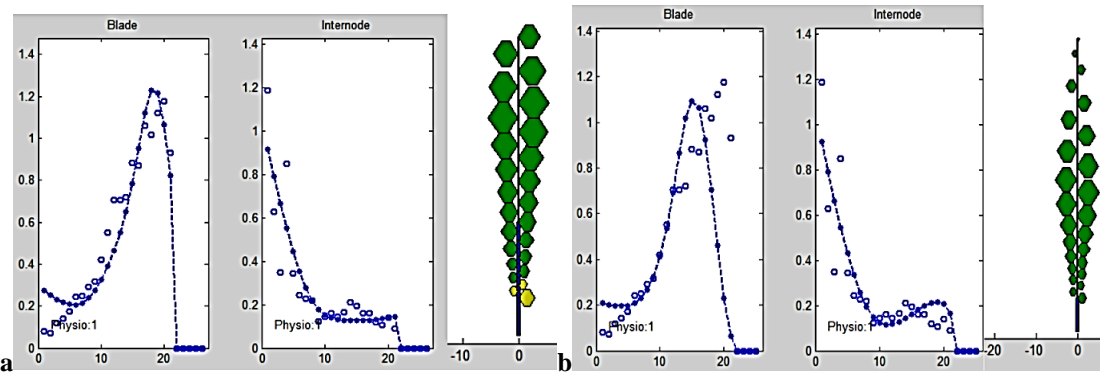
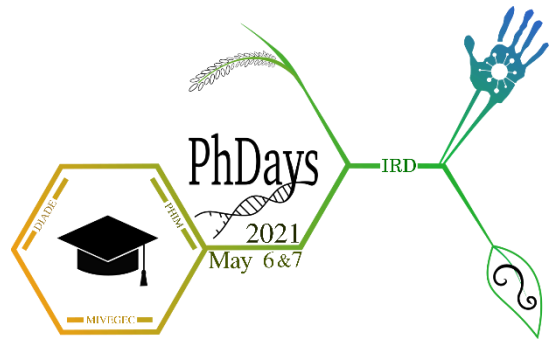


Fig 4. Organic series of organs constitution in *K. senegalensis* in Dalao (a) and Korhogo (a) at 6 months



A Montpellier, le 7/5/21,

Le comité d'organisation des PhDays 2021, composé de Ludivine GUIGARD, Ines OUEDRAOGO, Clarice MOULIN et Basak UYSAL, confirme la participation de Beda Innocent ADJI, doctorant, à notre évènement ce vendredi 7/5/2021.

Le comité des PhDays,

COLLOQUE

Beda Innocent Adji, Doffou Sélastique Akaffou and Sylvie Sabatier. 2021.

ZERO DEFORESTATION IMPORTEE : DEFINITION(S) ET CONDITIONS
D'INSERTION DANS LES ACCORDS COMMERCIAUX INTERNATIONAUX FUTURS.

*Colloque internationale sur la reflexion de strategies de conservation de la biodiversite et
d'adaptation au changement climatique, JUILLET 2021, AGROPOLIS MONTPELLIER,
FRANCE.*

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/363174265>

« Zéro déforestation importée » :Réseau sciences humaines & sociales d'ECOFOR : colloque 2021

Conference Paper · July 2021

CITATIONS

0

READS

6

3 authors:



Beda Innocent Adji

Université Jean Lorougnon Guédé

20 PUBLICATIONS 11 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Sélastique Akaffou

Université Jean Lorougnon Guédé

83 PUBLICATIONS 500 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Sylvie Sabatier

Cirad - La recherche agronomique pour le développement

85 PUBLICATIONS 716 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Études de caféiers sauvages endémique de la côte ouest de Madagascar [View project](#)



Culture de la symbiose anabaena azollae et azollae filliculoides et caroliniana :approche expérimentale. [View project](#)



INRAE

MAA

ONF

CNRS

CIRAD

IRD

AGROPARISTECH

CNPF

FCBA

IGN

MTE

MNHN

Destinataire : M. ADJI Beda Innocent, doctorant au CIRAD

Dossier suivi par : secretariat@gip-ecofor.org
Tél : 01 53 70 21 70

Attestation de présence

Je soussigné, Monsieur Nicolas PICARD, agissant en qualité de Directeur du Groupement d'Intérêt Public (GIP) ECOFOR, dont le siège social est sis 42 rue Scheffer, 75116 PARIS,

atteste que :

M. ADJI Beda Innocent a participé au colloque :

« Zéro déforestation importée : définition(s) et conditions d'insertion dans les accords commerciaux internationaux futurs »

co-organisé par le GIP ECOFOR et par le Cirad, FCBA, l'AFD et la Maison Française d'Oxford, le 5 juillet 2021 de 9h à 18h, à Agropolis (Montpellier) et en ligne.

Cette attestation est délivrée à la demande de l'intéressée pour servir et valoir ce que de droit.

A Paris, le 08/07/2021

Le Directeur du GIP ECOFOR
Nicolas PICARD



« ZÉRO DÉFORESTATION IMPORTÉE » : DÉFINITION(S) ET CONDITIONS D'INSERTION DANS LES ACCORDS COMMERCIAUX INTERNATIONAUX FUTURS ?



À vos
AGENDAS

5 JUILLET 2021

**AGROPOLIS (MONTPELLIER)
& EN LIGNE**

OBJECTIFS DU COLLOQUE :

Passage à l'agriculture ou dégradation de la forêt, comprendre la notion de « zéro déforestation ». Pour supprimer la déforestation importée à l'horizon 2030, quels sont les instruments d'action publique efficaces ?

INSCRIPTIONS ICI

OU AVEC CE QR CODE :



AGENDA

Session du matin (9h-12h)

« De quelle définition des forêts a-t-on besoin pour lutter contre la déforestation importée ? »

Présentations introductives (9h-10h30)

Table ronde (11h-12h)

Session de l'après-midi (14h-17h)

« Articulation entre politiques publiques et mécanismes privés pour la lutte contre la déforestation importée »

Présentations introductives (14h-15h30)

Table ronde (16h-17h)

COMITÉ SCIENTIFIQUE

Alain Karsenty (alain.karsenty@cirad.fr), CIRAD
Nicolas Picard (nicolas.picard@gip-ecofor.org), GIP ECOFOR
Pascal Marty (pascal.marty@mod-langs.ox.ac.uk), Maison française d'Oxford
Christophe Du Castel (ducastel@afd.fr), Agence Française de Développement

ORGANISATEURS

Julie Prigent (julie.prigent@gip-ecofor.org), GIP ECOFOR
Francis Bigot de Morogues (francis.de.morogues@fcba.fr), FCBA

FORMATION

Beda Innocent Adji. 2021.

RSTUDIO-TIDYVERSE ET RMARKDOWN, MODULE M DEB 1 ET DEB 2. *OCTOBRE
2021, AGROPOLIS-MONTPELLIER, FRANCE.*



DRH – Formation
TA : 174 / 04

ATTESTATION DE FORMATION

Ce document atteste que

M. Beda Innocent ADJI

A suivi la formation :

Formation à Rstudio-Tidyverse et Rmark Module M Deb 1 et Deb 2

Animée par Oswaldo Forey Formateur indépendant

Du 11 OCTOBRE 2021 au 12 OCTOBRE 2021

Lieu : Montpellier

Nombre d'heures de la formation : 14

Nombre d'heures réalisées : 14

Visa Drh-formation
Catherine GRIMAL



SEMINAIRE 2

Beda Innocent Adji, Doffou Sélastique Akaffou, Sylvie Sabatier, Marc Jaeger, Philippe De Reffye, Kouadio Henri Kouassi and Jérôme Duminil. **2022.**

ARCHITECTURE AND STRUCTURE-FUNCTION MODELLING OF NATIVE
AGROFORESTRY SPECIES OF COTE D'IVOIRE. *JEUDI DE L'AMAP*, JANVIER 2022,
MONTPELLIER, FRANCE. DOI: 10.13140/RG.2.2.32014.43847

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/359816819>

Séminaire / Seminar AMAP

Presentation · January 2022

DOI: 10.13140/RG.2.2.32014.43847

CITATIONS

0

READS

38

8 authors, including:



Beda Innocent Adji
Université Jean Lorougnon Guédé

20 PUBLICATIONS 11 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Sélastique Akaffou
Université Jean Lorougnon Guédé

83 PUBLICATIONS 500 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Jérôme Duminil
Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Montpellier, France

78 PUBLICATIONS 3,781 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Marc Jaeger
Cirad - La recherche agronomique pour le développement

118 PUBLICATIONS 1,661 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



AMAP-I2P [View project](#)



AMAPsim & GreenLab: Plant Architecture Modelling [View project](#)



Beda Innocent ADJI is currently a PhD student at the Jean Lorougnon Guédé University, Daloa, Côte d'Ivoire. Working on the architecture and structure-function modelling of native agroforestry trees in Côte d'Ivoire, he is interested in overexploited and threatened savannah species. He seeks to understand their functioning in order to optimise their cultivation.

Email: adjibedainnocent@gmail.com

27 JAN 2022
11h00 – 12h00

<https://umontpellier-fr.zoom.us/j/97971190061>
Salle 201, Bâtiment PS2, CIRAD-UMR AMAP

Architecture and structure-function modelling of native agroforestry species of Côte d'Ivoire

presented by

ADJI Beda Innocent

University of Jean Lorougnon Guédé/UMRAMAP – INRA, Montpellier, France

ABSTRACT

Khaya senegalensis, *Pterocarpus erinaceus* and *Parkia biglobosa* are three indigenous savannah species that are overexploited and highly threatened by rural populations for their multiple uses. Understanding their functioning is a preliminary solution for their replanting and sustainable management. The objective of this study is to optimise the cultivation of these trees in Côte d'Ivoire. Therefore, their sexual reproduction potential according to biotic provenances was tested, their architectural characteristics were researched, and finally the calculation and simulation of their development and growth in Phyto-Facto mode was undertaken by a collection of potential structures. The results showed that seed size are important selection tools for germination and obtaining vigorous and resilient seedlings ($P < 0.05$). Retrospective analysis indicated that *Khaya senegalensis* follows Rauh's architectural pattern with up to 5 branching orders, 4 axis categories; *Pterocarpus erinaceus* and *Parkia biglobosa* follow Troll's architectural pattern with up to 6 branching orders and 3 axis categories; their ontogeny proceeds in three phases: initiation to development and top establishment (young), then flowering and establishment of the architectural unit (adult) and finally duplication of the architecture by series of partial and total reiterations (old). The development of the species is stable between different age stages and can be calculated by a Bernoulli process, a crown analysis and a Binomial distribution. The growth shows an effect of Pressler's law ($\lambda = 0.8$) and the parameters obtained empirically are the leaf thickness ($\varepsilon = 0.013 \text{g/cm}^2$), the light extinction coefficient involved in Beer's law ($k = 1$), the climatic efficiency ($E_0 = 1$) and the production area ($Sp = 100000 \text{m}^2$). The composite organic series have a size of 400 DCs with 15 meta-cycles of development adjusted by 9 hidden parameters (r , Q_0 , P_c , $Bb1$, $Bi1$, P_c , $Pb2$, $Bc1$, $Pi1$ and $Pi2$). The correlation coefficient between the theoretical and observed parameters is $R^2 = 0.99$. These results lead to a computational plant model of the three species adapted to the needs of agroforestry from a new angle in Côte d'Ivoire and to envisage new agronomic and forestry applications.

KEY WORDS

Côte d'Ivoire, *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* et *Parkia biglobosa*, architecture, modelling.

Invited and animated by:

Dr. SABATIER Sylvie (UMR AMAP)

Type:

Research results

Oral language:

Français

Language of PPT:

Français

UMR « botAnique et bioinforMatique de l'Architecture des Plantes » (AMAP)
UMR 51 (CIRAD), UMR 5120 (CNRS), UMR 931 (INRAE), UR 2M123 (IRD), UM27 (UM)
c/o CIRAD – TA A-51/PS2 – Boulevard de la Lironde – 34398 Montpellier Cedex 5



COMMUNICATION 2

Beda Innocent Adji, Doffou Sélastique Akaffou, Kouadio Henri Kouassi and Sylvie Sabatier. **2022**.

LES MARQUEURS ARCHITECTURAUX, PRÉCIEUX OUTILS DE SÉLECTION POUR L'OPTIMISATION DU REBOISEMENT DES ESSENCES FORESTIÈRES INDIGÈNES EN CÔTE D'IVOIRE. *Valorisation du Bois B4AP « BOIS ET PLANTES À HAUTE VALEUR AJOUTÉE, ENJEUX ET PERSPECTIVES POUR LES PAYS DU SUD »*, AVRIL 2022, YAMOUSSOUKRO, CÔTE D'IVOIRE.

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/360264882>

Les marqueurs architecturaux, précieux outils de sélection pour l'optimisation du reboisement des essence....

Conference Paper · April 2022

CITATIONS

0

READS

49

4 authors:



Beda Innocent Adji

Université Jean Lorougnon Guédé

20 PUBLICATIONS 11 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Sélastique Akaffou

Université Jean Lorougnon Guédé

83 PUBLICATIONS 500 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Kouassi Kouadio Henri

Université Jean Lorougnon Guédé

31 PUBLICATIONS 35 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Sylvie Sabatier

Cirad - La recherche agronomique pour le dévelop...

85 PUBLICATIONS 716 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



MAGENA [View project](#)



Project of regeneration and rehabilitation of degraded forests [View project](#)



Les marqueurs architecturaux, précieux outils de sélection pour l'optimisation du reboisement des essences forestières indigènes en Côte d'Ivoire

ADJI Bèda Innocent¹, AKAFFOU Doffou Sélastique¹, KOUADIO Kouassi Henri¹, SABATIER Sylvie²

¹ Université Jean Lorougnon Guédé, Agroforestry UFR, BP 150, Daloa, Côte d'Ivoire

² CIRAD, UMR AMAP, F-34398 Montpellier, France

Les plantes au cours de leur développement laissent des signatures (marqueurs) architecturales, en réponse aux difficultés rencontrées dans un milieu. L'analyse rétrospective des axes dans l'architecture permet ainsi de reconnaître des traits et de sélectionner des génotypes résilients pouvant être utilisés pour optimiser la réussite du reboisement. La présente étude vise à identifier et à caractériser ces marqueurs chez trois espèces indigènes fortement exploitées en Côte d'Ivoire, que sont *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* et *Parkia biglobosa*. Une analyse rétrospective d'axes dans la cime de 420 individus jeunes, adultes et vieux par espèce a été réalisée dans deux habitats (milieu ouvert et sous-bois) de sept localités suivant un gradient bioclimatique Sud-Nord en Côte d'Ivoire. Les résultats ont montré que la longueur et le diamètre des unités de croissance, le nombre de phytomère par unité de croissance les arrêts de croissance varie d'une localité à une autre. Ces marqueurs sont influencés par l'âge des individus contrairement à l'habitat. Ils ont permis d'identifier les zones propices de culture des espèces cibles. En définitive, ces marqueurs architecturaux pourraient aider dans la gestion durable et dans la régénération de la forêt en Côte d'Ivoire.

Mots clés : Côte d'Ivoire, *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus*, *Parkia biglobosa*, Marqueurs architecturaux, Régénération forestière

République de Côte d'Ivoire

.....



ATTESTATION DE PARTICIPATION



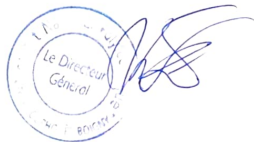
décerne à

ADJI BEDA INNOCENT

pour sa participation effective à la conférence

« Bois et plantes à haute valeur ajoutée, enjeux et perspectives pour les pays du sud »
à l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny, Yamoussoukro les 27 et 28 Avril 2022

Le Directeur Général de l'INP-HB



La Coordinatrice du projet B4AP



Fait à Yamoussoukro le 27 Avril 2022



COMMUNICATION 3

Beda Innocent Adji, Doffou Sélastique Akaffou and Sylvie Sabatier. 2022.

PRODUCTION DE SEMENCE DE QUALITE POUR L'OPTIMISATION DU
REBOISEMENT DES ESSENCES FORESTIERES INDIGENES EN COTE D'IVOIRE.
COP15-SENACC2022 « *Seminaire national sur L'adaptation aux changements climatiques* »,
MAI 2022, ABIDJAN, COTE D'IVOIRE.

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/362691332>

Production de semence de qualité pour l'optimisation du reboisement des essences forestières indigènes en Côte d'Ivoire

Conference Paper · May 2022

CITATIONS

0

READS

7

3 authors:



Beda Innocent Adji

Université Jean Lorougnon Guédé

20 PUBLICATIONS 11 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Sélastique Akaffou

Université Jean Lorougnon Guédé

83 PUBLICATIONS 500 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Sylvie Sabatier

Cirad - La recherche agronomique pour le développement

85 PUBLICATIONS 716 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



AGROFORESTERIE CACAOYER [View project](#)



Intégration de trois essences forestières indigènes dans les systèmes agroforestiers pour l'amélioration des conditions de vie des populations locales et le maintien de la biodiversité [View project](#)

Production de semence de qualité pour l'optimisation du reboisement des essences forestières indigènes en Côte d'Ivoire

ADJI Beda Innocent¹, AKAFFOU Doffou Sélastique¹, SABATIER Sylvie²

¹ Université Jean Lorougnon Guédé, UFR Agroforesterie, BP 150, Daloa, Côte d'Ivoire

² CIRAD, UMR AMAP, F-34398 Montpellier, France

Auteur correspondant: adjibedainnocent@gmail.com

Résumé

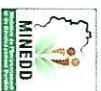
La taille des graines est un facteur clés pouvant affecter le processus de régénération des populations végétales. Cette étude vise à d'identifier des semences performantes pouvant optimiser la culture de trois espèces forestières indigènes surexploitées en Côte d'Ivoire, que sont *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* et *Parkia biglobosa*. Une conduite du potentiel germinatif et de semis vigoureux a été appliquée sur 1080 graines par espèce dans deux environnements distincts (sec et humide) en Côte d'Ivoire. Les résultats ont montré que les grosses graines de *Khaya senegalensis* et *Pterocarpus erinaceus* sont les meilleurs candidats pour une germination optimisée, contrairement à *Parkia biglobosa*, (petites et moyennes graines). Cependant, les semis de meilleures performances ont été générés par la germination des grosses graines quel que soit l'espèce et le site d'étude. Ces résultats sont des outils d'aides importants pouvant contribuer à la gestion durable des espèces cibles et servir de base de restructuration de la politique de régénération de la forêt en Côte d'Ivoire.

Mots clés : Semences de qualité, *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus*, *Parkia biglobosa*, Côte d'Ivoire.

Abstract

Seed size is a key factor that can affect the regeneration process of plant populations. This study aims to identify efficient seeds that can optimise the cultivation of three overexploited native forest species in Côte d'Ivoire, namely *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus* and *Parkia biglobosa*. A germination potential and vigorous seedling test was applied to 1080 seeds per species in two distinct environments (dry and humid) in Côte d'Ivoire. The results showed that large seeds of *Khaya senegalensis* and *Pterocarpus erinaceus* are the best candidates for optimised germination, in contrast to *Parkia biglobosa* (small and medium seeds). However, the best performing seedlings were generated by germinating large seeds regardless of species and study site. These results are important aids that can contribute to the sustainable management of target species and serve as a basis for restructuring forest regeneration policy in Côte d'Ivoire.

Keywords: Seeds quality, *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus*, *Parkia biglobosa*, Côte d'Ivoire.



Ministère de l'Enseignement
Supérieur et de la
Recherche Scientifique



N° 19052237

ATTESTATION DE PARTICIPATION

Le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD), Le Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (MINEDD) et le West African Science Service Centre on Climate Change and Adapted Land Use (WASCAL/CEA-CCBAD) Certifie que :

ADJI BEDA INNOCEN

a participé et présenté une communication orale au séminaire national sur l'adaptation aux changements climatiques (SENACC 2022), qui s'est déroulé du 16 au 19 mai 2022, à l'espace Latrille Events (Abidjan, Côte d'Ivoire).

Thème : « PRODUCTION DE SEMENCE DE QUALITE POUR L'OPTIMISATION DU REBOISEMENT DES ESSENCES FORESTIERES INDIGENES EN COTE D'IVOIRE »

En foi de quoi, la présente attestation lui est délivrée pour servir et valoir ce que de droit.

Fait à Abidjan, le 19 mai 2022

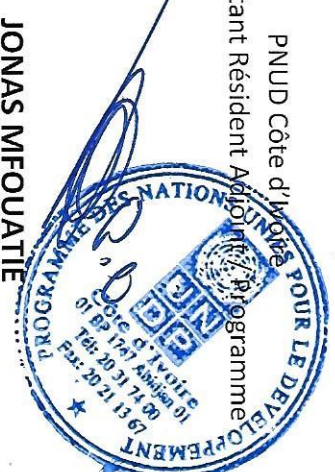
Pour le-Ministre de l'Environnement et du
Développement durable / et par Délégation
le Directeur de Cabinet



Pour le Ministre de l'Enseignement
Supérieur et de la Recherche Scientifique/
et par Délégation le Directeur de Cabinet



PNUD Côte d'Ivoire
Représentant Résident Adjoint Programme



JONAS MFOUATIE