



HAL
open science

Biomécanique de l'hévéa de plantations : sensibilité à la casse au vent

Arnauld Clauvy'S Engonga Edzang

► To cite this version:

Arnauld Clauvy'S Engonga Edzang. Biomécanique de l'hévéa de plantations : sensibilité à la casse au vent. Matériaux. Université Clermont Auvergne, 2023. Français. NNT : 2023UCFA0026 . tel-04405936

HAL Id: tel-04405936

<https://theses.hal.science/tel-04405936v1>

Submitted on 19 Jan 2024

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 CLERMONT AUVERGNE

ECOLE DOCTORALE
SCIENCES POUR L'INGENIEUR DE CLERMONT-FERRAND

THÈSE

Présentée par

Arnauld Clauvy's ENGONGA EDZANG

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR D'UNIVERSITÉ

SPÉCIALITÉ : MATERIAUX-GENIE CIVIL

Titre de la thèse :

**Biomécanique de l'hévéa de plantations : Sensibilité
à la casse au vent**

Soutenue publiquement le 20 mars 2023 devant le jury :

Mme JULLIEN Delphine, MC Univ. Montpellier (HDR),	Rapporteuse
Mme STOKES Alexia, DR INRAE Montpellier (HDR),	Rapporteuse
M. GARDINER Barry, DR IEFC Pierroton,	Examineur
Mme DLOUHA Jana, CR INRAE Nancy,	Examinatrice
M. MOULIA Bruno, DR INRAE Clermont-Ferrand (HDR),	Examineur
M. GRIL Joseph, DR CNRS Clermont-Ferrand (HDR),	Directeur de thèse
M. MOUTOU PITTI Rostand, MC UCA (HDR),	Co-Directeur de thèse
M. BADEL Eric, CR INRAE Clermont-Ferrand (HDR),	Co-Directeur de thèse

Remerciements

Exprimer en quelques mots toute ma reconnaissance envers les personnes qui m'ont aidé durant ce travail de thèse est sans doute la tâche la plus difficile.

En premier lieu, je remercie l'Institut Français du Caoutchouc (IFC), les sociétés Michelin, SIPH et SOCFIN, et les directeurs des plantations SOGB et SAPH-Bongo en Côte d'Ivoire pour le financement accordé dans le cadre du projet Vent Debout et l'appui logistique apporté sur les plantations, qui ont permis le bon déroulement des expérimentations réalisées dans le cadre de cette thèse. Je remercie également l'Etat Gabonais par l'intermédiaire de l'Agence Nationale des Bourses du Gabon (ANBG) pour le soutien financier au cours de ces années de thèse.

Ce travail n'aurait pu aboutir sans le soutien d'une équipe d'encadrement exceptionnelle. Un GRAND MERCI à mon directeur de thèse **Monsieur Joseph Gril** pour sa disponibilité en tout temps et à toute heure de la journée pour répondre à mes nombreuses questions, pour toutes ces séances de travail parfois dans des endroits improbables comme le hall de ma résidence étudiante. Un GRAND MERCI également mes co-directeurs **Monsieur Eric Badel** et **Monsieur Rostand Moutou Pitti** pour m'avoir ouvert les portes de cette aventure qu'est la thèse. La confiance et patience qu'ils m'ont témoignées, m'ont permis d'aborder cette thèse avec plus de sérénité. Je n'oublie pas le soutien qu'ils m'ont apporté au cours de ces années de thèse, notamment, lors de la crise sanitaire et pendant la période de rédaction.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à l'ensemble des membres de mon jury de soutenance de thèse d'avoir accepté d'évaluer ce travail. Merci à Madame Delphine Jullien, Madame Alexia Stokes, Madame Jana Dlouha et Monsieur Barry Gardiner ; merci à Monsieur Bruno Moulia d'avoir présidé ce jury et pour tous ces conseils avisés.

Mes remerciements vont également aux différents membres de mes comités de thèse pour leurs conseils avisés et leur disponibilité, notamment, à Monsieur Thierry Fourcaud pour avoir pris le temps de m'expliquer les relations entre l'architecture de l'arbre, la répartition de la biomasse et leurs propriétés.

Je remercie chaleureusement l'ensemble des membres du laboratoire PIAF pour ces trois années passées en leur compagnie, particulièrement à l'équipe MECA et à Dominique Tiziani pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire et à toutes les personnes qui ont contribué au bon déroulement de mes travaux de thèse : Stéphane Ploquin, Sandrine Meyniel, Sylvie Vayssie, Norbert Frizot. Je remercie plus particulièrement Stéphane pour son aide précieuse dans la préparation des différentes campagnes expérimentales et dans la réalisation de mesure d'infradensité sur une centaine de petits échantillons ; pour son accueil au sein de l'équipe MECA et son soutien moral, notamment, lors des différents confinements.

Mes remerciements s'adressent à l'ensemble du personnel du Hall GC de Polytech et à Gaël Godi pour sa disponibilité et son aide lors des essais de flexion.

Merci à André Clément-Demange et Vincent Dellus pour leurs conseils dans les expérimentations et leurs encouragements.

Merci à l'ensemble des doctorants-es, post-doctorants-es et stagiaires avec qui j'ai partagé de très bons moments et parfois des galères au cours de ces années de thèse. Merci à Martian Asseko Ella, Nhat-Tùng Phan, Bilal Yoka Khail, Arnoul Van Rooij, Arthur Bontemps, Mahaut Van Rooij, Erwan Tinturier, Lucie Heim, Rime Chehade, Caroline Forestti Oliveira, Khaled, Mohamed Chetoui, Mohamed Tahiri, Sugimoto Hideharu, Cédric Lemaire. Je garde un agréable souvenir de toutes nos soirées pizza et jeux de société. Un merci spécial à Claude

Pambou Nziengui et Benjamin Niez pour tous leurs conseils et les encouragements pendant les premiers mois de thèse.

Je ne saurais passer outre le soutien de mes frères et amis-es, pour leurs encouragements durant ces années de thèse et plus encore pendant la phase de rédaction du manuscrit. Merci à Errol Mognala Moukagny, Gilles Hunel Koumba, Pacifique Filankembo, Elvine Nyadzangoye Loudit, Guy Boussougou Boussougou, Bleck Nzengue et Priscille Chalois, Mathilde Guisset. Merci à vous pour tous ces moments de détente qui m'ont bien permis d'évacuer la pression de temps à autre.

Enfin, je souhaite remercier toute ma famille pour leur encouragement, l'intérêt qu'ils ont porté à mes travaux ; pour leur soutien tout au long de mes études et en particulier durant ces années de thèse, et ce, malgré la distance qui nous sépare : merci à ma mère Françoise Abore Edzang, à ma petite sœur Myrva Mengue Mba et mon amie Cathy Diabouveye, pour votre écoute et votre patience.

Résumé

L'hévéa (*Hevea brasiliensis*) est la principale source de production de caoutchouc naturel avec plus de 13 millions de tonnes par an. Cette production est basée sur des plantations industrielles et villageoises dans les régions tropicales humides. Pour récolter le latex, une entaille est pratiquée dans l'écorce de l'arbre pour sectionner les cellules laticifères et permettre l'écoulement du latex. Malheureusement, au cours de leur vie économique dans la plantation (entre 35 et 40 ans), les hévéas sont sensibles aux dommages causés par le vent, notamment la rupture du tronc. On estime que sur 30 ans, les pertes dues à la casse au vent des arbres s'élèvent à près de 40%. Les plantations industrielles d'hévéas sont organisées en parcelles monoclonales. Les plants de culture sont sélectionnés pour leur productivité, leur résistance aux maladies, etc., mais pas pour leur comportement mécanique ni leur sensibilité à la casse, faute d'outils adaptés pour l'évaluation de ces critères par les sélectionneurs. Les observations de terrain montrent des différences interclonales de sensibilité à la casse au vent, ce qui rend d'autant plus importante l'évaluation des critères mécaniques. Parmi les causes connues de ces différences chez l'hévéa, il y a la compétition entre la production de latex et la croissance, la forme de la couronne ou la présence de bois de tension. Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes intéressés au comportement mécanique des tiges de deux clones d'hévéa dont l'un (IRCA825) est réputé très sensible et l'autre (IRCA41) résistant à la casse. Nous avons étudié des paramètres biomécaniques tels que la rigidité de flexion (EI) des tiges, la rigidité du bois vert (E) et sa résistance à la rupture (MOR). Pour évaluer ces paramètres, nous avons effectué des essais de flexion sur pied, jusqu'à rupture des troncs, dans des champs clonaux situés en Côte d'Ivoire, suivis d'essais de caractérisation du bois au laboratoire. L'analyse comparative des essais de flexion sur pied montre que les clones IRCA825 et IRCA41 ont des rigidités de flexion des tiges équivalentes. Cependant, IRCA41 se distingue de IRCA825 par une rigidité du bois vert et une résistance à la rupture plus élevées, ce qui explique principalement sa meilleure résistance au vent. L'analyse comparative de la structure du bois a montré quant à elle que ces différences de rigidité du bois et de résistance à la rupture sont principalement dues à une densité du bois plus élevée chez IRCA41 que chez IRCA825, l'angle de microfibrilles et le module spécifique étant peu différents. En outre, nous avons étudié la capacité thigmomorphogénétique des clones, c'est-à-dire d'acclimatation, à leur environnement venteux, à travers un dispositif de haubanage des arbres. Les résultats préliminaires de cet essai ont permis de mettre en évidence, pour la première fois, la capacité de ces deux clones d'hévéa à répondre aux stimulations mécaniques dues au vent après seulement 6 mois. Toutefois, le bénéfice mécanique de cette acclimatation, ainsi que sa variation interclonale, restent à évaluer.

Mots clefs : *Hevea brasiliensis* – vent – rupture – moment fléchissant – rigidité de flexion – biomécanique – acclimatation

Abstract

Rubber tree (*Hevea brasiliensis*) is the main source of natural rubber production with more than 13 million tons per year. This production is based on industrial and village plantations in the tropical humid zone. To harvest the latex, a cut is made in the bark of the tree to sever the laticifere cells and allow the latex to flow. Unfortunately, during their economic lives on the plantation (between 35 and 40 years), rubber trees are susceptible to wind damage, including trunk breakage with tree losses of almost 40% over 30 years. Industrial rubber plantations use monoclonal plots. The seedlings are selected for their productivity, resistance to disease, etc., but not for their mechanical behaviour nor their susceptibility to breakage, due to the lack of suitable tools for the evaluation of these criteria by the breeders. Field observations show interclonal differences in sensitivity to wind breakage, which makes important the evaluation of mechanical criteria. Among the causes of these differences in rubber trees, there is the competition between latex production and growth, the crown shape or the presence of tension wood. In this work, we focused on the mechanical behaviour of the stems of two rubber clones: one (IRCA825) is known to be very sensitive and the other (IRCA41) resistant to breakage. We investigated biomechanical parameters like tree bending stiffness (EI), green wood stiffness (E) and breakage resistance (MOR). To assess these parameters, we conducted standing bending tests in clonal fields in Ivory Coast, followed by green-wood mechanical characterisation. Comparative analysis of the field bending tests showed that clones IRC825 and IRCA41 have equivalent stem bending stiffness. However, IRCA41 differs from IRCA825 with a higher greenwood stiffness and breaking strength, which mainly explains its better wind resistance. Comparative analysis of the wood structure showed that the differences in wood stiffness and breaking strength are mainly due to the higher wood density in IRCA41 compared to IRCA825; the microfibril angle and specific modulus were not different between these two clones. In addition, we investigated the acclimation capacity of the trees to their windy environment, through a tree bracing system. The preliminary results of this trial showed, for the first time, the ability of these two rubber clones to adjust their growth to wind after only 6 months. However, the mechanical benefit of this acclimation, as well as its interclonal variation, remains to be evaluated.

Key word: *Hevea brasiliensis* - wind - breaking - bending moment - bending stiffness - biomechanics – acclimation

Table des matières

Remerciements	3
Résumé	5
Abstract	6
Table des matières	7
Index des figures	10
Index des tableaux	15
Introduction	17
Chapitre 1: Synthèse bibliographique	19
1.1 L'Hévéa (Hévéa Brasiliensis) de la forêt naturelle aux plantations industrielles	19
1.1.1 Histoire de l'hévéaculture	19
1.1.2 L'hévéa : biologie et écologie de l'arbre	20
1.1.2.1 Croissance de l'hévéa	20
1.1.2.2 Ecologie de l'hévéa.....	22
1.1.2.3 De l'arbre au bois.....	23
1.1.2.4 Structure générale du bois chez les feuillus	25
1.1.2.5 Contraintes de croissance dans l'arbre et bois de réaction chez les feuillus	26
1.1.2.5.1 Contraintes de croissance	26
1.1.2.5.2 Bois de tension	26
1.1.3 Exploitation du latex et conséquences physiologiques pour l'arbre	28
1.1.4 Propriétés mécaniques du bois	29
1.1.4.1 Quelques notions de mécanique des milieux continus.....	29
1.1.4.2 Déterminants affectant les propriétés mécaniques du bois	33
1.1.4.2.1 La masse volumique ou densité et l'infradensité	33
1.1.4.2.2 L'angle des microfibrilles (AMF).....	35
1.2 La casse au vent des arbres et l'hévéaculture	36
1.2.1 Profil de vent dans un couvert forestier.....	36
1.2.2 Modélisation de la charge du vent sur l'arbre : coefficient de sécurité	37
1.2.3 Les différents types de dommages liés au vent dans les plantations d'hévéas : effet sur les peuplements	40
1.2.3.1 Les types de dégâts dans les plantations d'hévéas	40
1.2.3.2 Effet de la casse sur les peuplements d'hévéa	41
1.3 Réponses physiologiques des arbres aux sollicitations dues au vent : la thigmomorphogenèse	42
1.3.1 Perception des déformations locales : la mécano-perception, réponses en croissances primaire et secondaire	42
1.3.2 Changements de comportement de la tige induits par la croissance modifiée par des stimuli mécaniques	42
1.3.3 Acclimatation de la structure anatomique et conséquences sur les propriétés du bois	43
1.4 Hypothèses sur la variabilité interclonale de la casse au vent de l'hévéa	44
1.4.1 Le projet vent debout.....	45
1.4.2 Démarche de la thèse.....	46
Chapitre 2: Comportement mécanique des tiges des clones d'hévéa IRCA825 et IRCA41	47
2.1 Introduction	47

2.2	Expérimentation in-situ.....	47
2.2.1	Dispositif expérimental	48
2.2.1.1	Sélection des blocs expérimentaux	48
2.2.1.2	Sélection des arbres au sein des parcelles.....	49
2.2.1.3	Morphométrie des arbres et mesures de biomasse	51
2.2.2	Essai de flexion d'arbre sur pied	56
2.2.2.1	Protocoles d'essai de flexion sur pied : comportement élastique.....	56
2.2.2.2	Protocoles d'essai de flexion sur pied : comportement de rupture	58
2.2.3	Méthode d'analyse des données	59
2.2.3.1	Moment fléchissant total appliqué à l'arbre.....	59
2.2.3.2	Rigidité de flexion, Contrainte longitudinale à la périphérie du tronc et module d'élasticité..	62
2.2.3.3	Prétraitement effectué sur les données brutes	63
2.3	Résultats et discussions	64
2.3.1	Analyse comparative de la forme du tronc et du houppier chez les clones IRCA825 et IRCA41	64
2.3.1.1	Caractéristiques de la morphologie des arbres de deux clones et biomasse aérienne	64
2.3.1.2	Facteur d'élanement des arbres des deux clones.....	66
2.3.2	Relation entre les mesures mécaniques in-situ de 2021 et 2022.....	67
2.3.3	Analyse comparative du comportement élastique du tronc des clones IRCA825 et IRCA41	69
2.3.3.1	Rigidité de flexion EI des arbres des deux clones.....	69
2.3.3.2	Module d'élasticité du bois vert des deux clones.....	71
2.3.3.3	Influence de la direction de flexion sur la rigidité du tronc et le module d'élasticité du bois vert chez les deux clones	73
2.3.4	Analyse comparative du comportement à la rupture du tronc chez les clones IRCA825 et IRCA41	74
2.3.4.1	Moment fléchissant à la rupture des arbres des deux clones.....	74
2.3.4.2	Description de la rupture des arbres.....	75
2.3.4.3	Résistance à la rupture du bois vert dans l'arbre chez les deux clones	76
2.3.5	Facteur de sécurité au vent chez les clones d'hévéas IRCA825 et IRCA41	78
2.3.6	Bilan sur les différences interclonales de comportement mécanique de la tige.....	79
Chapitre 3:	Caractérisation du bois produit par les clones d'hévéa IRCA825 et IRCA41	81
3.1	Introduction	81
3.2	Echantillonnage	81
3.3	Méthodes.....	83
3.3.1	Mesure de propriétés physiques et mécaniques sur barreaux de bois.....	83
3.3.1.1	Mesure non-destructive par la méthode du BING	83
3.3.1.2	Essais de flexion 3 points.....	85
3.3.1.3	Essais de flexion 4 points.....	86
3.3.1.4	Mesure de l'infradensité	88
3.3.2	Mesure de paramètres physiques sur rondelles de bois : densité à l'échelle du cerne et angle de microfibrilles	89
3.3.2.1	Mesure de densité à l'échelle du cerne	89
3.3.2.2	Mesure de l'angle de microfibrilles (AMF).....	89
3.3.3	Méthode de calcul des profils moyens des variations de propriétés.....	90
3.4	Résultats	91
3.4.1	Résultats des mesures non-destructives de propriétés physiques et mécaniques sur les barreaux de bois	91
3.4.1.1	Résultats sur la caractérisation non destructive des barreaux de bois de 2021	91
3.4.1.2	Résultats sur la caractérisation non destructive des barreaux de bois de 2022	93
3.4.2	Résultats des mesures destructives de propriétés mécaniques sur les barreaux de bois	96
3.4.2.1	Résultats sur la caractérisation destructive des barreaux de 2021	96
3.4.2.2	Résultats sur la caractérisation destructive (rupture) des barreaux de 2022	98

3.4.3	Résultats des mesures sur rondelles de bois	101
3.4.4	Vérification de la cohérence entre mesures indépendantes de la même grandeur	102
3.5	Discussion	103
3.5.1	Corrélation entre résistance et mesures non destructives	103
3.5.2	Cohérence entre les mesures mécaniques sur bois et sur arbre	104
3.5.3	Relations entre paramètres physiques et propriétés mécaniques	106
3.5.4	Comparaison interclonale des propriétés du bois	110
3.6	Synthèse sur les différences de propriétés du bois entre les clones IRCA825 et IRCA41	112
Chapitre 4: Acclimatation mécanique des clones d'hévéa IRCA825 et IRCA41		
4.1	Introduction	114
4.2	Matériel et méthodes	114
4.2.1	Sélection des arbres	115
4.2.2	Mise en place et suivi de l'essai	117
4.3	Premiers résultats et discussion	119
4.3.1	Perception des stimulations mécaniques dues au vent chez les clones IRCA825 et IRCA41	119
4.3.2	Comparaison interclonale de la perception des stimulations mécaniques dues au vent	121
4.3.3	Conséquences sur le comportement mécanique des tiges	122
Chapitre 5: Conclusion générale et Perspectives		
5.1	Synthèse des résultats acquis	124
5.2	Perspectives	125
5.2.1	A court terme : Dispositif expérimental de retard de saignée	125
5.2.2	A long terme	126
Bibliographie		127
Annexes		136

Index des figures

Figure 1-1: Disposition en étage des ramifications d'un jeune hévéa. Le terme U.C désigne l'Unité de Croissance (Combe et Du Plessix, 1974).....	21
Figure 1-2: Section transversale du tronc d'hévéa. On distingue sur la figure l'écorce, le bois et la moelle ; les taches blanches de la périphérie de la section représentent le latex.....	23
Figure 1-3: a. Schéma d'une coupe de tronc d'hévéa mature. Le tissu externe et interne sont représentés ; et on retrouve le xylème, le cambium (bande violette), le phloème et le manteaux laticifère en bande rouge (Jacob et al., 1994). b. Coupe transversale du tronc d'hévéa réalisée au microscope optique. On y distingue le xylème, le cambium, les manteaux laticifères en bande noire et les rayons médullaires (de Fayé et al, 1989).....	24
Figure 1-4: a. Direction de référence du matériau bois. La direction longitudinale L correspond à l'axe du tronc (de la branche, de la racine), la direction tangentielle T correspond à la tangente aux cernes de croissance et la direction radiale R correspond à la perpendiculaire aux directions L et T passant par le centre biologique de l'arbre (qui n'est pas forcément le centre géométrique). b. Structure tridimensionnelle générale des feuillus (schéma modifié d'après (Lecomte-Schmitt, 2014)).	25
Figure 1-5: . Distribution des contraintes résiduelles de maturation dans une tige verticale bien équilibrée de Peuplier (d'après Okuyama cité dans (Gril et al., 2017)).	26
Figure 1-6: Localisation du bois de tension.	27
Figure 1-7: (A et B) Cas du bois « normal » ; (C et D) cas du bois de tension : développement de la couche G (Déjardin et al., 2010). (ML+PCW) représentent la lamelle moyenne et la paroi primaire de la fibre, (S1, S2, S3) les couches de la paroi secondaire. (G) correspond à la couche gélatineuse formée dans le bois de tension.	28
Figure 1-8: Schéma de courbe contrainte-déformation typique. σ correspond aux contraintes appliquées au matériau et ε à ses déformations. E représente le module d'élasticité longitudinal du matériau, σ_r sa contrainte à la rupture (avec ε_r la déformation associée à σ_r) et σ_{el} ; représente la contrainte élastique limite du matériau (avec ε_{el} la déformation associée à σ_{el}).	32
Figure 1-9: Relation entre densité et modules d'élasticité du bois à 12% d'humidité relative	34
Figure 1-10: Variation du module d'élasticité longitudinal d'une fibre en fonction de l'angle des microfibrilles, d'après Navi (1988) cité dans (Navi et al., 1995). L'AMF est représenté par α sur la figure.	35
Figure 1-11: Schématisation de l'action du vent sur l'arbre et sa réaction.	39
Figure 1-12: Exemple de dommages causés par le vent dans les plantations d'hévéas en Côte d'Ivoire. a. Chablis, avec un exemple d'effet « domino ». b. Volis, avec rupture au-dessus du panneau de saignée.....	40
Figure 1-13: a. Coupe transversale d'une plante témoin. b. Coupe transversale de plantes soumises à des contraintes mécaniques. Trois zones sont nommées sur la coupe transversale : (C) zone soumise à la contrainte de compression, (T) zone soumise à contrainte de traction et (N) zone neutre (Niez et al., 2019).....	43
Figure 2-1: a. Carte de la Côte d'Ivoire avec la localisation du site expérimental. Pluviométrie mensuelle moyenne (b) et vitesse de vent moyenne (c) pour les villes d'Abidjan, de San-Pedro et Tabou en Côte d'Ivoire (source : https://fr.weatherspark.com).	47
Figure 2-2: a. Carte générale des blocs d'hévéa de la SOGB, chaque couleur de cette carte représente une des 18 divisions de la SOGB. b. carte du bloc BR85 (4°42'48.8"N,7°10'36.6"O). c. carte du bloc SR12 (4°39'01.6"N,7°06'41.8"O). Les zones encadrées en rouge sur les cartes b) et c) représentent les panneaux sélectionnés pour les différentes expérimentations. Les chiffres en noir et rouge dans ces quadrilatères représentent respectivement le numéro de la parcelle et le nombre d'emplacement d'arbre (voir légende).....	49

Figure 2-3: a. Arbre sélectionné pour les essais de flexion sur pied et marqué en rouge (état du tronc avant la saignée). b. Etat du tronc de l'arbre après 1 an de saignée. Les numéros marqués sur le tronc correspondent au numéro de l'arbre dans la parcelle.	51
Figure 2-4: Principaux dispositifs et appareils de mesure utilisés au cours des expérimentations. a. Mesure de la hauteur et de la taille du houppier. b. Pesées des différents éléments aériens de l'arbre (tronc, branches). c. Dispositifs de mesures de force, déformation et inclinaison pour les essais de flexion sur pied.....	53
Figure 2-5: Schéma du test de flexion non destructif, avec la position des différents capteurs. H hauteur totale de l'arbre, z_F hauteur au point de fixation du câble sur l'arbre, z_P hauteur du centre de gravité de la partie au-dessus de z_F , β angle du câble avec l'horizontale, L_{TC} distance de l'arbre au point d'ancrage du tire-câble à la base de l'arbre voisin, ε déformation mesurée par l'élastomètre, θ_{rs} rotation du système racine-sol mesurée par l'inclinomètre, F force appliquée par le tire-fort, P poids du houppier, ΔL raccourcissement de la longueur du câble.	57
Figure 2-6: Disposition des capteurs sur le tronc. Chaque disque correspond à une section du tronc où les déformations ont été mesurées ($z = 1$ m, $z = 1,70$ m et $z = 2,5$ m) ; les carrés bleu, jaune, rouge et vert représentent les élastomètres ; les flèches au-dessus des disques indiquent le sens et la direction de flexion.	58
Figure 2-7: Schéma du test de rupture indiquant la disposition des capteurs. Ici, les élastomètres sont placés du côté tendu de la tige en flexion. L'inclinomètre à la base de la tige mesure la rotation (θ_{rs}) du système racine-sol et celui à 5 m environ mesure la rotation de la section (θ_{5m}). Un second tire-câble est placé à la base de l'arbre pour empêcher le déracinement.	59
Figure 2-8: Modèle de flexion. Les paramètres Z , Z_n et Θ (en majuscule) caractérisent les valeurs au niveau des éléments ; alors que les paramètres z , z_n et θ_n (en minuscule) caractérisent les valeurs aux nœuds. Les paramètres v_F , $v(Z_n)$ et $v(Z_G)$ sont des déplacements horizontaux des différentes parties de l'arbre.....	61
Figure 2-9: Modélisation de la distribution des masses au sein de l'arbre. Chaque élément n est caractérisé par sa hauteur Z_n , sa circonférence C_n et sa masse m_n . De même, chaque nœud n est caractérisé par sa hauteur z_n , sa circonférence c_n et sa masse m_n	62
Figure 2-10: Filtrage des données brutes des essais de flexion sur pied par une moyenne glissante sur une période de 5 secondes.	63
Figure 2-11: Evolution des rigidités de flexion mesurées en 2022 en fonction de celles mesurées en 2021 chez des arbres du clone IRCA825 (a) et du clone IRCA41 (b). Evolution du module d'élasticité mesuré en 2022 en fonction de celui mesuré en 2021 chez des arbres du clone IRCA825 (c) et du clone IRCA41 (d). Les barres horizontales et verticales correspondent aux écart-types.	68
Figure 2-12: Courbe force-déformation pour un essai de flexion d'arbres sur pied non destructif	69
Figure 2-13: Distribution de la rigidité de flexion des arbres IRCA825 et IRCA41. Valeurs mesurées en 2021 à différentes hauteurs ($z = 1, 1,7$ et $2,5$ m). Un test de comparaison interclonale a été effectué, p correspond à la p-value de ce test. (*) indique une différence significative.	70
Figure 2-14: Distribution des valeurs de module d'élasticité mesurées en 2021 sur les arbres des clones IRCA815 et IRCA41, à différentes hauteurs ($z = 1, 1,7$ et $2,5$ m). Un test de comparaison interclonale a été effectué, p correspond à la p-value de ce test. (*) : indique une différence significative.	72
Figure 2-15: Evolution de la rigidité de flexion dans la direction parallèle en fonction de la rigidité de la direction perpendiculaire. Les points rouges correspondent aux valeurs moyennes.	73

Figure 2-16: Evolution du module d'élasticité du bois formé dans la direction parallèle à la direction de vent dominant en fonction du module d'élasticité du bois formé dans la direction perpendiculaire. Les points rouges correspondent aux valeurs moyennes.....	74
Figure 2-17: Evolution du moment fléchissant lors de la rupture des arbres IRCA825 et IRCA41, en fonction de la hauteur de mesure. Les deux courbes correspondent aux valeurs moyennes et les barres verticales correspondent aux écart-types.	75
Figure 2-18: Les différentes étapes aboutissant à la rupture d'une tige d'hévéa sous charge statique.	76
Figure 2-19: Evolution de la contrainte maximale le long des tiges IRCA825 et IRCA41 en fonction de la hauteur de mesure sur l'arbre. Les deux courbes correspondent aux valeurs moyennes et les barres verticales correspondent aux écart-types. Les deux lignes verticales (en pointillé et trait plein) correspondent aux hauteurs moyennes de rupture observées sur le terrain.	77
Figure 2-20: Facteur de de sécurité (FS) moyen pour chaque clone. FS est calculé à partir de l'expression proposée par Noyer (2017). Les barres verticales correspondent aux écart-types. P correspond à la p-value du test de comparaison (bilatérale) interclonale.	78
Figure 3-1: Echantillonnage et schéma de débit des différents échantillons pour la détermination des propriétés mécanique (a) et physiques (b, c et d).	83
Figure 3-2: a. Dispositif expérimental de l'essai de flexion/compression dynamique par la méthode BING. La percussion est exercée à l'aide d'un instrument rigide (ici une clé plate fait office de marteau) suivant la direction tangentielle. Le signal est capté par le microphone, converti par le Picoscope (b) et analysé en fréquence par le logiciel BING. d. Exemple d'analyse du signal pour un échantillon, les 4 pics de la courbe en bleu correspondent aux fréquences mesurées et les barres verticales en vert correspondent aux fréquences calculées par le modèle de Bernoulli ou Timoshenko.	84
Figure 3-3: a. Dispositif expérimental de l'essai de flexion 3 points. b. Schématisation de l'essai. c. Exemple de courbe contrainte déformation d'un essai de flexion 3 points.	86
Figure 3-4: Dispositif expérimental de l'essai de flexion 4 points. Mesure du déplacement sans contact à l'aide d'un extensomètre vidéo videoXtens 3-300.....	87
Figure 3-5: a. Schématisation de l'essai de flexion 4 points, avec la mesure du déplacement par suivi de marqueurs. b. Représentation graphique de la relation entre la courbure et le moment fléchissant.	88
Figure 3-6: Mesure du volume saturé (a) et de la masse sèche (b) des échantillons de bois. La mesure du volume saturé utilise le principe d'Archimède consistant à mesurer le volume d'un échantillon en mesurant par pesée le volume d'eau qu'il déplace lorsqu'il est immergé dans un liquide.....	89
Figure 3-7: Distribution des valeurs d'infradensité mesurées sur les barreaux issus du lot de planches (A1, A2, B1, B2, C1, C2) du clones IRCA825 (a) et du lot de planches (D1, D2, E1, E2, F1, F2) du clone IRCA41 (b). Distribution des valeurs de module d'élasticité dynamique E_{dyn} mesurées sur les barreaux issus du lot de planches (A1, A2, B1, B2, C1, C2) du clone IRCA825 (c) et du lot de planches (D1, D2, E1, E2, F1, F2) du clone IRCA41 (d). La barre horizontale correspond à la moyenne de l'ensemble des barreaux du clone considéré.	92
Figure 3-8: Profils des variations diamétrales de propriétés du bois. Variations diamétrales de l'infradensité sur les planches du clone IRCA825 (a) et du clone IRCA41 (b). Variations diamétrales du module d'élasticité dynamique (E_{dyn}) sur les planches du clone IRCA825 (c) et du clone IRCA41 (d). La ligne verticale en pointillé représente la position de la moelle.	94
Figure 3-9: Profils moyens des variations radiales de propriétés mesurées sur des planches de bois des clones IRCA825 et IRCA41. a. Variations radiales de l'infradensité. b. Variations radiales du module d'élasticité dynamique E_{dyn} . c. Variations radiales du rapport E_{dyn}/ID . Les barres verticales et horizontales sur chaque courbe correspondent aux écart-types.	95

Figure 3-10: Distribution des valeurs de module d'élasticité statique en flexion 3 points (E_{F3P}) mesuré sur les barreaux issus du lot de planches (A1, A2, B1, B2, C1, C2) du clones IRCA825 (a) et du lot de planches (D1, D2, E1, E2, F1, F2) du clone IRCA41 (b). Distribution des valeurs de modules de rupture (MOR) mesurés sur les barreaux issus du lot de planches (A1, A2, B1, B2, C1, C2) du clone IRCA825 (c) et du lot de planches (D1, D2, E1, E2, F1, F2) du clone IRCA41 (d). La barre horizontale correspond à la moyenne de l'ensemble des barreaux du clone considéré.....	97
Figure 3-11: Profils des variations diamétrales de propriétés du bois. Variations diamétrales du module d'élasticité statique en flexion 4 points (E_{F4P}) sur les planches du clone IRCA825 (a) et du clone IRCA41 (b). Variations diamétrales du module de rupture (MOR) sur les planches du clone IRCA825 (c) et du clone IRCA41 (d). La ligne verticale en pointillé représente la position de la moelle.	99
Figure 3-12: Profils moyens des variations radiales de propriétés physiques et mécaniques en fonction de la position dans l'arbre (éloignement à la moelle) mesurées sur des planches des clones IRCA825 et IRCA41. a. Variations radiales du module d'élasticité en flexion 4 points (E_{F4P}). b. Variations radiales du module de rupture. c. Variations radiales du rapport E_{F4P}/ID . Les barres verticales et horizontales sur chaque courbe correspondent aux écart-types.	100
Figure 3-13: a. Profils moyens des variations radiales de microdensité chez les clones IRCA825 et IRCA41. b. Profils moyens des variations radiales de l'angle de microfibrilles chez les deux clones.....	101
Figure 3-14: Relation entre l'infradensité mesurée (méthode d'Archimède) et l'infradensité calculée à partir des relations de Kollmann et Côté (1968) et définie par les équations 1.8 et 1.10. Les barres horizontales et verticales correspondent aux écart-types, et r^2 au coefficient de regression.	102
Figure 3-15: Relations entre le module d'élasticité dynamique moyen et les modules d'élasticité statiques moyen en flexion 3 points (campagne 2021) et flexion 4 points (campagne 2022). Les barres horizontales et verticales correspondent aux écart-types, et r^2 au coefficient de regression.	103
Figure 3-16: Relation entre module d'élasticité dynamique des échantillons de bois et leurs résistances à la rupture MOR. Les barres horizontales et verticales correspondent aux écart-types, et r^2 au coefficient de corrélation.	104
Figure 3-17: Relations entre les mesures mécaniques sur l'arbre sur pied et sur des échantillons de bois vert récoltés après abattage. a. Evolution du module d'élasticité E mesuré sur l'arbre sur pied et le module d'élasticité dynamique E_{dyn} mesuré sur échantillon (méthode BING) b. Evolution du module d'élasticité (mesure arbre sur pied) en fonction du module d'élasticité statique E_{F3P} et E_{F4P} mesuré sur échantillons prélevés après abattage. Les barres horizontales et verticales correspondent aux écart-types.....	105
Figure 3-18: Relation entre la résistance du bois vert mesurée sur l'arbre sur pied et la résistance mesurée sur des échantillons de bois vert prélevés après abattage. Les barres horizontales correspondent aux écart-types.	106
Figure 3-19: Relations entre les propriétés mécaniques des échantillons de bois prélevés après abattage et l'infradensité. a. Corrélation avec les modules d'élasticité statique en flexion 3 et 4 points. b. Corrélation avec le module d'élasticité dynamique. c. Corrélation avec le module de rupture. Les barres horizontales et verticales correspondent aux écart-types, et r^2 au coefficient de corrélation.	107
Figure 3-20: Relations entre les propriétés mécaniques des échantillons de bois et la densité à 12% d'humidité du bois (mesurée par microdensitométrie). a. Corrélation avec les modules d'élasticité statique en flexion 3 points. b. Corrélation avec le module d'élasticité dynamique.	

c. Corrélation avec le module de rupture. Les barres horizontales et verticales correspondent aux écart-types, et r^2 au coefficient de corrélation.	108
Figure 3-21: Relations entre les propriétés mécaniques des échantillons de bois et l'angle de microfibrilles. a. Corrélation avec les modules d'élasticité statique en flexion 3 points. b. Corrélation avec le module d'élasticité dynamique. c. Corrélation avec le module de rupture. Les barres horizontales et verticales correspondent aux écart-types, et r^2 au coefficient de corrélation.....	109
Figure 3-22: Comparaison interclonale des valeurs des modules d'élasticité dynamique E_{dyn} (a) et des modules de rupture (b), mesurées sur les échantillons de bois vert prélevés après abattage. (*) indique une différence significative du test de comparaison bilatéral avec p la p-value.	110
Figure 3-23: Comparaison interclonale des valeurs d'infradensité (a) et de densité à 12% d'humidité du bois (b), mesurées sur les échantillons de bois prélevés après abattage. (*) indique une différence significative du test de comparaison bilatéral avec p la p-value.	111
Figure 3-24: Comparaison interclonale des valeurs d'angles de microfibrilles (a) et du module spécifique (b), mesurées sur les échantillons de bois prélevés après abattage. p correspond à la p-value du test de comparaison bilatéral. c. Relation entre l'AMF et le module spécifique (rapport E_{dyn}/ID). Les barres horizontales et verticales correspondent aux écart-types, et r^2 au coefficient de corrélation.....	112
Figure 4-1: a. Carte générale des blocs d'hévéa de la SOGB, chaque couleur de cette carte représente une des 18 divisions de la SOGB. b. Carte du bloc BR85 (clone IRCA825). c. Cartes du bloc SR11 (clone IRCA41). Les zones encadrées en rouge sur les cartes a) et b) représentent les panneaux sélectionnés pour les différentes expérimentations.	115
Figure 4-2: a. Schéma du dispositif d'haubanage. b. Zoom de la zone de fixation du hauban en hauteur sur le tronc. c. Zoom de la zone d'ancrage des haubans au pied des arbres voisins.	118
Figure 4-3: Echantillonnage et marquage de la hauteur de suivi de croissance des arbres du dispositif d'haubanage. Les paires d'arbres (haubanés et témoins non-haubanés) sont sélectionnés côte à côte, dans une même ligne. Le marquage à la peinture signifie aussi aux saigneurs que ces arbres ne doivent pas être considérés en production de latex.	119
Figure 4-4: Evolution au cours du temps de la circonférence des arbres haubanés (aH) et des arbres témoins (aT). a. Circonférence moyenne des arbres chez le clones IRCA825. b. Circonférence moyenne des arbres chez le clone IRCA41. Les barres verticales sur chaque courbe correspondent aux écart-types.	120
Figure 4-5: Distribution de la croissance cumulée des arbres haubanés (aH) et des arbres témoins (aT) au cours des 3 premières périodes de mesure ; de 12/20 à 6/21, de 12/20 à 12/21 et de 12/20 à 6/22. a. Croissance secondaire des arbres du clones IRCA825. b. Croissance secondaire des arbres du clone IRCA41. Les barres verticales correspondent aux écart-types.	121

Index des tableaux

Tableau 1-I: Classification de quelques clones d'hévéa en fonction du nombre d'arbres cassés après une tempête en 1967 et 1978, d'après Nicolas (1990).....	41
Tableau 2-I: Liste des arbres testés pour la caractérisation du comportement mécanique sur pied. Les arbres sont classés en ordre croissant du numéro de panneau et du numéro de l'arbre. (×) : flexion non destructive uniquement (1 ^{ère} campagne expérimentale 2021), (+) : test de rupture uniquement (2 ^e campagne expérimentale 2022).....	50
Tableau 2-II: Principales mesures effectuées sur chaque arbre du clones IRCA825. (×) : 1 ^{ère} campagne expérimentale 2021, (+) : 2 ^e campagne expérimentale 2022, (×+) : 1 ^{ère} et 2 ^e campagne expérimentale, (-) : mesure non réalisée.	54
Tableau 2-III: Principales mesures effectuées sur chaque arbre du clones IRCA41. (×) : 1 ^{ère} campagne expérimentale 2021, (+) : 2 ^e campagne expérimentale 2022, (×+) : 1 ^{ère} et 2 ^e campagne expérimentale, (-) : mesure non réalisée.	55
Tableau 2-IV: Valeurs moyennes des principaux paramètres morphologiques des arbres des clones IRCA815 et IRCA41(campagnes expérimentales de 2021). Le diamètre du houppier n'a pas été mesuré ici. Les valeurs du tableau sont données avec ± un écart-type. Un test de Student compare les deux clones et p correspond à la p-value de ce test. S : différence significative, NS : différence non-significative.....	64
Tableau 2-V: Valeurs moyennes des principaux paramètres morphologiques des arbres des clones IRCA815 et IRCA41(campagne expérimentale de 2022). Les valeurs du tableau sont données avec ± un écart-type. Un test de Student compare les deux clones et p correspond à la p-value de ce test. S : différence significative, NS : différence non-significative.	65
Tableau 2-VI: Valeurs moyennes de biomasse aérienne de 3 arbres du clone IRCA825 et 3 arbres du clones IRCA41 en 2021. Ici les arbres pesés avaient tous leurs feuilles. Les valeurs du tableau sont données avec ± un écart-type. Un test de Student compare les deux clones et p correspond à la p-value de ce test. S : différence significative, NS : différence non-significative.	65
Tableau 2-VII: Valeurs moyennes de biomasse aérienne de 5 arbres du clone IRCA825 et 9 arbres du clones IRCA41 en 2022. Ici les arbres étaient en pleine période de défoliation. Les valeurs du tableau sont données avec ± un écart-type. Un test de Student compare les deux clones et p correspond à la p-value de ce test. S : différence significative, NS : différence non-significative.	66
Tableau 2-VIII: Valeurs moyennes du facteur d'élancement des arbres IRCA825 et IRCA41, en 2021 et en 2022. Les valeurs du tableau sont données avec ± un écart-type. Un test de Student compare les deux clones et p correspond à la p-value de ce test. S : différence significative, NS : différence non-significative.....	67
Tableau 2-IX: Valeurs moyennes de rigidité de flexion des arbres des clones IRCA825 et IRCA41, mesurées lors de la campagne de 2022. Un test de Student compare les deux clones et p correspond à la p-value de ce test. NS : différence non-significative.	71
Tableau 2-X: Valeurs moyennes de module d'élasticité mesuré en 2022 sur des arbres des clones IRCA825 et IRCA41, à différentes hauteurs. Un test de Student compare les deux clones et p correspond à la p-value de ce test. NS : différence non-significative.	72
Tableau 3-I: Liste des différents éléments prélevés lors des deux campagnes expérimentales de 2021 et 2022, pour les essais de caractérisations.	81
Tableau 3-II: Identification des différents échantillons de bois après usinage des planches, pour les essais de caractérisation. Les rondelles sont numérotées du bas vers le haut, tandis que les barreaux sont numérotés arbitrairement d'une extrémité à l'autre de la planche.	81

Tableau 3-III : Valeur moyenne de l'infradensité, du module d'élasticité dynamique (E_{dyn}) et du rapport E_{dyn}/ID , pour tous les barreaux issus des planches prélevés à la même hauteur. 'Planche 1', prélevé entre la base et 1 m et 'Planche 2', prélevé entre 1 et 1,7 m. Les moyennes sont données avec \pm un écart-type. S : différence significative, NS : différence non-significative. 93

Tableau 3-IV: Valeur moyenne du module d'élasticité dynamique (E_{F3P}), du module de rupture (MOR) et du rapport E_{F3P}/ID , pour tous les barreaux issus des planches prélevées à la même hauteur. 'Planche 1', prélevée entre la base du tronc et 1 m de hauteur et 'Planche 2', prélevée entre 1 et 1,7 m de hauteur. Les moyennes sont données avec \pm un écart-type. S : différence significative, NS : différence non-significative..... 97

Tableau 4-I: Liste des arbres sélectionnés pour le dispositif de haubanage. Les arbres sont groupés par paire et classés par ordre croissant du numéro de panneau et du numéro de la ligne. Le statut de l'arbre correspond aux deux modalités de l'essai, 'aH' pour « arbre haubané » et 'aT' pour « arbre témoin ». 116

Introduction

L'hévéa (*Hevea brasiliensis*) ou arbre à caoutchouc, est un feuillu tropical originaire de la forêt amazonienne qui a été domestiqué pour son lait riche en particules de latex. Il représente l'unique source de production de caoutchouc naturel utilisé dans diverses industries, notamment pneumatique et médicale (fabrication de gants, de préservatifs...). La production de caoutchouc par l'hévéa se fait à partir de plantations industrielles notamment en Asie du sud-est (Thaïlande, Indonésie, Vietnam...) et en Afrique (Côte d'Ivoire, Nigeria...). Pour récolter le précieux latex, les exploitants ont recours à la méthode de la « saignée » consistant à sectionner les cellules laticifères situées en-dessous de l'écorce. Ce protocole génère un stress physiologique continu sur l'arbre et a pour conséquence la réduction de sa croissance primaire et secondaire (Silpi et al., 2006; Thaler, 2012).

Les plantations d'hévéa sont le plus souvent monoclonales, avec une sélection des plants basée sur de multiples critères tels que la vitesse de croissance, la productivité de latex et ses indicateurs physiologiques, la résilience du peuplement exploité dans le temps, la tolérance aux stress abiotiques tels que la sécheresse du panneau d'exploitation et la tolérance aux maladies foliaires fongiques (Gohet et al., 1996; Clément-Demange et al., 1997; Déon et al., 2014). Cependant, les producteurs et les sélectionneurs ne disposent pas de critères mécaniques pertinents pour estimer la sensibilité des arbres face au vent, ou pour améliorer préventivement leur résistance mécanique. En effet, au cours de leur vie économique en plantation, les hévéas sont assez sensibles aux dégâts (chablis et volis) dus au vent (Nicolas, 1990; Fourcaud et al., 1998; Clément-Demange et al., 2007). Cela limite les zones d'hévéaculture aux régions qui ne subissent pas régulièrement des cyclones ou des typhons. Et même dans ces régions, on enregistre des dommages lors d'épisodes de vents d'intensité modérée, principalement de la casse de tronc dont l'impact semble varier d'un clone à l'autre.

La connaissance des facteurs et mécanismes biomécaniques liés à la rupture des arbres due au vent a fortement progressé au cours des dernières décennies (Petty et Swain, 1985; Moore et Gardiner, 2001; Peltola, 2006; Fournier et al., 2013; Gardiner et al., 2016). Des études expérimentales et numériques ont permis de démêler les contributions relatives de l'architecture des arbres, notamment du système racinaire, et des propriétés du matériau bois sur la réponse biomécanique aux vents (Sellier et Fourcaud, 2009, 2005; Yang et al., 2017). La distribution longitudinale de la croissance secondaire a également été étudiée et s'est révélée être un paramètre central de la sensibilité à la rupture de tronc (Alméras et Fournier, 2009; Ancelin et al., 2004; Bossu et al., 2018). Ainsi, pour comprendre les différences de sensibilité à la casse au vent des clones d'hévéa, des études ont porté sur la compétition entre la production de latex et la croissance (Gohet et al., 1996; Silpi et al., 2006), la forme de la couronne (Combe et Du Plessix, 1974; Hofmann, 1984; Fourcaud et al., 1999; Milet, 2001) ou la présence de bois de tension (Nicolas et Hofmann, 1977). Toutefois, très peu d'études se sont intéressées au comportement mécanique des différents clones d'hévéa (Fourcaud et al., 1998; Fourcaud, 2005). De plus, il a été montré clairement que lorsqu'un arbre est soumis à des coups de vents d'intensité relativement forte mais sans dommages, il régule sa croissance conférant ainsi à la tige une meilleure résistance. C'est la thigmomorphogenèse (Coutand et al., 2009; Bonnesoeur et al., 2016; Telewski, 2016; Niez et al., 2020). Cette capacité naturelle d'acclimatation des arbres à leur environnement venteux n'a cependant jamais été étudiée chez l'hévéa.

Dans le cadre de ce travail de thèse, on s'intéresse donc d'une part, au comportement mécanique de deux clones d'hévéa dont les sensibilités à la casse au vent sont reconnues contrastées : le clone IRCA825 sensible à la casse au vent et le clone IRCA41 résistant à la casse au vent. On

s'intéresse plus précisément aux paramètres biomécaniques que sont la rigidité de flexion des arbres, la rigidité du matériau bois produit par ces clones et sa résistance à la rupture, afin de comprendre les facteurs explicatifs de la différence de sensibilité à la casse de ces clones. En parallèle, on s'intéresse à la capacité d'acclimatation thigmomorphogénétique de ces deux clones. Ce travail de thèse s'appuie sur deux grands dispositifs d'essais au champ, accompagnés de mesures au laboratoire. Il s'articule globalement autour de 5 chapitres :

Le Chapitre 1 présente tout d'abord l'histoire de l'hévéa culture et son importance au fil des années (depuis les premières plantations à nos jours). Il présente ensuite une synthèse bibliographique sur la croissance de l'hévéa et la formation du bois chez les feuillus, d'une part, sur la casse au vent des arbres en général et celle de l'hévéa en particulier, d'autre part. Il présente également une synthèse bibliographique sur l'acclimatation des arbres au vent et ses conséquences sur l'arbre et la structure du bois. Enfin, ce chapitre présente le cadre général de ce travail de thèse ainsi que les hypothèses de travail.

Le Chapitre 2 présente le dispositif expérimental complet pour la caractérisation au champ du comportement mécanique des clones d'hévéas étudiés et l'ensemble des résultats obtenus au cours de ces essais de flexion sur pied.

Le Chapitre 3 présente l'ensemble des essais de caractérisation du bois produit par les deux clones d'hévéa, ainsi que l'ensemble des résultats obtenus lors de ces essais.

Le Chapitre 4 présente le dispositif d'essai de caractérisation de la capacité d'acclimatation thigmomorphogénétique des deux clones d'hévéa. Il présente également les résultats préliminaires sur la réponse d'acclimatation de croissance aux stimulations mécaniques dues au vent de ces clones d'hévéa.

Le Chapitre 5 présente enfin, une synthèse des résultats obtenus durant ce travail de thèse et propose quelques perspectives pour la suite de ce projet.

Chapitre 1: Synthèse bibliographique

1.1 L'Hévéa (*Hévéa Brasiliensis*) de la forêt naturelle aux plantations industrielles

1.1.1 Histoire de l'hévéaculture

Jusqu'aux années 1870, la production de caoutchouc naturelle provenait du Brésil. Elle n'était quasiment issue que de l'exploitation de l'arbre du Pará (Hévéa) de la forêt vierge amazonienne et représentait près de 8000 tonnes de caoutchouc naturel. Dès les années 1880, les besoins en caoutchouc se voient augmentés avec l'avènement du transport routier. Cela aura pour effet la surexploitation et le commerce des caoutchoucs provenant des plantes à latex de forêt (Ceara ou *Manihot glaziowi*, *Ficus elastica* et *Funtumia elastica*...). En 1900 la production de caoutchouc sylvestre était estimée à plus de 50 000 tonnes, dont presque la moitié provient des côtes d'Afrique, du Sénégal à l'Angola (Leplae, 1926; Chevalier, 1948; Volper, 2012).

Les premières cultures de plantes productrices de caoutchouc ont vu le jour au Ceylan (Sri Lanka) vers 1880, grâce aux semences d'hévéa envoyé du Brésil par H.A. Wickham. De toutes les semences envoyées par ce dernier, seules 4% des graines germineront pour donner les premiers plants d'hévéa cultivés au jardin botanique de Paradeniya à Ceylan (Sri Lanka) (Volper, 2012). Les plants ainsi obtenus seront distribués dans toutes les possessions britanniques d'Asie orientale. Les quatre premières tonnes de caoutchouc issues exclusivement des plantations (d'Asie orientale) seront mises sur le marché en 1900. Cette production va donner un nouveau souffle à la production de caoutchouc naturel ; surtout avec la dévastation des peuplements naturels de *Landolphia* et de *Funtumia* en Afrique due à l'exploitation massive de ces plantes. Cette production issue de plantation a permis l'extension de la culture de l'hévéa à la péninsule malaise. En 1915, l'ensemble de ces territoires (d'Asie orientale et péninsule malaise) fournissent sur le marché mondial un peu plus de 90 000 tonnes de caoutchouc de plantation. Dans la région indochinoise, les premières semences d'hévéa ont été expédiées de Java en 1897 et semées dans le jardin d'essai (de 500 hectares) de Ong-Yem en Cochinchine. Cette première plantation d'hévéa fournira toutes les semences nécessaires au développement de la production de caoutchouc en Indochine de 1907 à 1914. Malgré le manque d'enthousiasme (comparativement au pays voisin : Malaisie et Indes néerlandaises) de l'hévéaculture indochinoise, on note une hausse du nombre d'exploitation avec 166 000 hectares d'hévéas plantés (Soliva, 1942; Chevalier, 1948; Volper, 2012).

En Afrique, les premières plantations de plante à caoutchouc datent de 1907 au Liberia (aux environs de Monrovia) avec 435 ha. Pour une raison non précisée par les différentes sources, ces plantations avaient d'abord été abandonnées vers 1915 avant d'être reprises en 1920 par H. S. Firestone (Compagnon, 1986a). Après avoir remis en état les plantations abandonnées, ce dernier les étendit à plus de 3000 ha. Dans la même période, d'autres européens encouragés par la réussite des plantations Firestone au Libéria, entreprirent aussi de petites plantations d'Hévéa dans l'Ouest africain français et l'Afrique équatoriale française (Leplae, 1926; Chevalier, 1948; Volper, 2012).

Depuis les premières plantations au Ceylan (Sri Lanka), la culture de l'hévéa n'a eu de cesse de s'étendre. Aujourd'hui, on estime à plus de 12 millions d'hectares de plantation d'hévéa dans le monde. C'est beaucoup moins que le palmier à huile avec environ 20 millions d'hectares mais un peu plus que le cacao avec environ 8 millions d'hectares dans le monde ([Hévéa - Contexte et enjeux | Cirad](#)). L'hévéaculture représente actuellement environ 47% de la

production mondiale d'élastomère, avec un peu plus de 13 millions de tonnes en 2020 ([La production \(groupesifca.com\)](http://La-production(groupesifca.com))).

1.1.2 L'hévéa : biologie et écologie de l'arbre

Le nom Hévéa désigne de façon générale les clones de l'espèce *Hevea brasiliensis*, seule espèce cultivée. A l'état naturel, l'hévéa est un grand arbre au tronc droit cylindrique et légèrement renflé à la base. Son houppier atteint généralement le sommet de la canopée et est donc difficilement observable du sol en forêt. Dans son environnement naturel, il atteint des hauteurs de 25 à 30 m pour une circonférence à hauteur de poitrine de 1 à 3 m. Cependant, il n'est pas rare de rencontrer des arbres atteignant les 50 m de hauteur pour une circonférence de 5 m, sur des sols bien drainés du Sud-Ouest du bassin amazonien (Hofmann, 1984). En plantation, la croissance de l'hévéa est fortement réduite du fait du traumatisme que génère les saignées répétitives et différentes pratiques sylvicoles. La durée de vie d'un arbre en plantation est d'environ 35 ans, ce qui correspond à la durée moyenne d'exploitation d'une plantation. Dans ces conditions, la circonférence des arbres avoisine seulement les 1 m pour une hauteur d'environ 25 m en fin de récolte du latex (Ahoba et al., 2011).

L'hévéa a une écorce vert grisâtre qui couvre un bois non différencié. Ces feuilles se composent de trois folioles allongées et disposées à l'extrémité d'un pétiole. Les fleurs, unisexuées comme pour tous les Euphorbiacées, sont petites, jaune clair et rassemblées en grappes. Le fruit de l'hévéa est une capsule qui possède 3 loges contenant chacune une graine de la taille d'une noix. Ces graines d'environ 2 cm ont une forme ovale, quelquefois ronde, et sont décorées de tâches blanchâtres. Ces deux caractéristiques des graines d'hévéa (forme et motif des tâches blanchâtres) sont génétiquement spécifiques à l'individu qui les a produites (Compagnon, 1986a).

La séquence du génome de l'espèce *Hevea brasiliensis* a récemment été décrit par Tang en 2016. Tout comme les autres espèces du genre, son génome haploïde comporte 18 paires de chromosomes ($2n = 36$). La taille de ce génome est estimée à 1.47×10^9 paires de bases (Lespinasse et al., 2000; Tang et al., 2016).

1.1.2.1 Croissance de l'hévéa

Un arbre vivant et en croissance possède deux compartiments principaux : une partie souterraine constituée des racines, responsables de l'absorption de l'eau et des nutriments minéraux, de l'ancrage mécanique de l'arbre et du stockage des substances biochimiques ; et une partie aérienne constituée du tronc ou tige et du houppier ou ensemble des branches (ramification) et des feuilles. Les premières années de croissance de l'arbre sont marquées par l'accroissement en longueur de l'axe ou tige, pour répondre au besoin de lumière : c'est la croissance primaire. La croissance primaire, résulte de l'activité des cellules du méristème dit primaire ou méristème apical caulinaire. Ce dernier assure la mise en place des organes constituant le futur axe (feuilles, nœuds...) et son allongement. Ainsi, le méristème primaire est responsable du développement des ramifications.

La croissance primaire du système aérien de l'hévéa est de nature rythmique, c'est-à-dire qu'elle alterne entre des phases d'élongation rapide correspondant à la formation de l'ensemble du verticille foliaire et des phases de repos correspondant à la maturation des feuilles. La portion d'axe mise en place lors d'une phase d'élongation ininterrompue est appelée unité de croissance (U.C) (Milet, 2001). L'axe de la tige apparaît comme formé d'une succession linéaire d'unités de croissance (**Figure 1-1**). Cette croissance rythmique de l'hévéa est propre au modèle architectural de Rauh (Hofmann, 1984; Compagnon, 1986a) et dont les caractéristiques sont :

- Tronc monopode à croissance rythmique conférant aux branches une disposition verticillée ou subverticillée ;
- Branches orthotropes, identiques au tronc et à même croissance rythmique ;
- Floraison toujours latérale sur branches ou sur tronc et sans influence sur la croissance de l'appareil végétatif aérien.

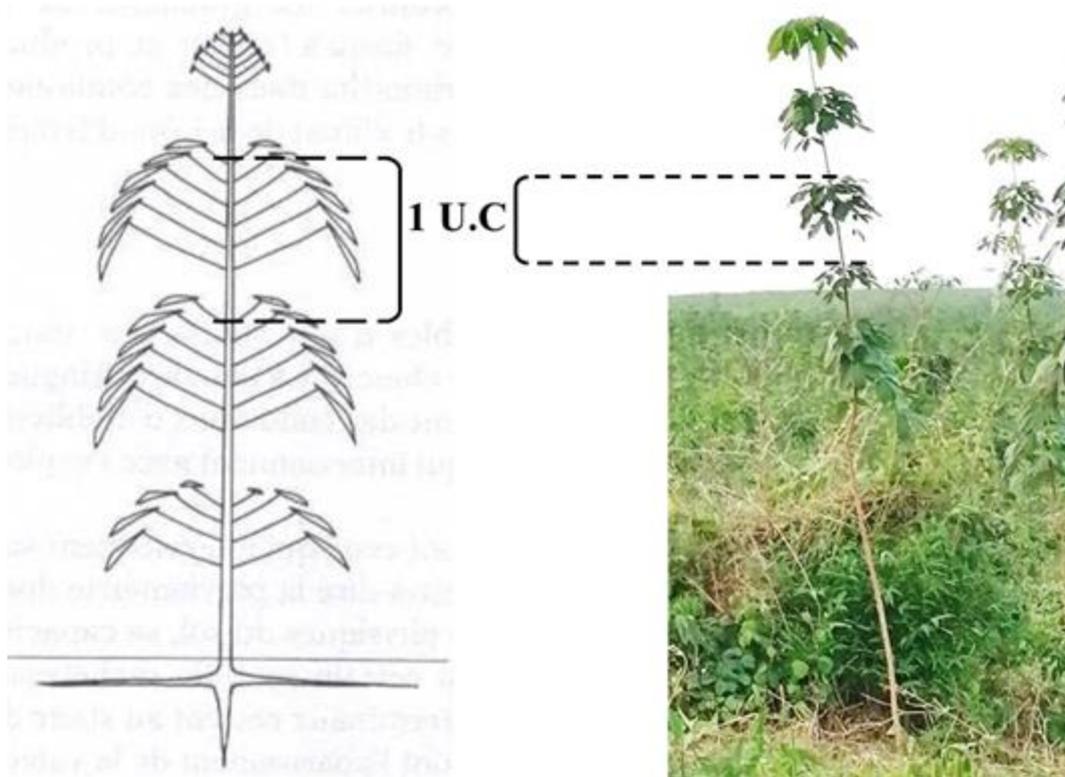


Figure 1-1: Disposition en étage des ramifications d'un jeune hévéa. Le terme U.C désigne l'Unité de Croissance (Combe et Du Plessix, 1974).

Le cycle morphogénétique complet aboutissant à la formation d'une unité de croissance sur l'axe principal dure en moyenne 6 semaines et varie selon les clones (Compagnon, 1986a; Le Guen, 2008). Chaque cycle morphogénétique aboutissant à la formation d'une U.C peut être décomposé en quatre stades, à savoir :

- **Débourrement** : les feuilles écailles du bourgeon terminal s'ouvrent, la nouvelle unité de croissance apparaît (stade A) ;
- **Croissance** : l'élongation des entre-nœuds s'accompagne de l'apparition de feuilles très anthocyanique (pigments naturels des feuilles de couleur rougeâtre) et brillantes, les nouvelles feuilles sont d'abord dressées verticalement puis se renversent vers le sol (Stade B);
- **Maturation foliaire** : les limbes encore pendants et flasques s'accroissent rapidement, ils perdent leur anthocyane et deviennent vert clair (stade C) ;
- **Dormance** : les limbes deviennent raides et se redressent et leur couleur vert s'intensifie (stade D).

Ces 4 stades, qui durent en moyenne 9, 11, 10 et 12 jours respectivement, sont repérables à l'œil (Hofmann, 1984). L'allongement progressive de la tige observé dès le stade C, est accompagné d'une croissance en diamètre : le fonctionnement du cambium se synchronise avec celui du méristème apical (Compagnon, 1986a). Ce schéma de croissance correspond surtout au jeune plante d'hévéa. Néanmoins, toute la vie l'arbre est caractérisée par cette croissance rythmique.

Au bout de la 9^e ou 10^e U.C après 1 ou 2 ans de croissance, la plante est suffisamment vigoureuse et commence à se ramifier.

1.1.2.2 *Ecologie de l'hévéa*

De par ces origines, l'hévéa prospère en climat équatorial ou tropical humide, avec des températures annuelles moyennes élevées et une forte humidité. En raison de l'étendue de son habitat naturel et du relief qu'on y rencontre, on y trouve de fortes différences climatiques. Cela laisse penser que l'hévéa peut vivre dans des limites écologiques assez étalées (Bouychou, 1963; Compagnon, 1986a). Cependant, il est nécessaire de faire la distinction entre les conditions climatiques permettant la seule subsistance de l'hévéa et les conditions assurant une productivité économique, c'est-à-dire une rentabilité des plantations.

Plusieurs caractéristiques climatiques sont essentielles à la croissance de l'hévéa et à la production de latex (Rao et al., 1998; Abd Karim, 2017; Ali et al., 2021), notamment :

- **Température** : il est généralement admis que l'hévéa prospère dans les zones à températures annuelles moyennes de l'ordre de 25° C. On note cependant que l'hévéa peut supporter des chutes de température assez prononcées à condition qu'elles soient de courte durée et peu fréquentes. La température fait partie des conjonctures climatiques qui conditionnent l'écoulement du latex au moment de la saignée ; la production journalière étant plus élevée en fin de cycle végétatif (au début de la saison sèche) lorsque les températures matinales sont d'environ 14 à 18 °C ;
- **Pluviométrie** : la hauteur d'eau annuelle et la répartition des pluies sont d'une grande importance en hévéaculture. Des précipitations moyennes annuelles allant de 1800 à 2500 mm conviennent généralement pour satisfaire les exigences de l'hévéa et son exploitation. Les périodes de plantation doivent ainsi tenir compte des alternances climatiques et leurs variations, les saisons sèches étant un danger pour la survie des arbres. Une pluviométrie annuelle trop élevée perturbe cependant la saignée, générant des pertes de production. De plus, des pluies abondantes ont aussi l'inconvénient de favoriser des attaques de maladies ;
- **Hygrométrie** : dans toutes les régions d'hévéacultures, le degré hygrométrique de l'atmosphère est toujours proche de la saturation aux premières heures de la matinée. Ces conditions favorisent le bon écoulement du latex mais aussi les attaques de certaines maladies.

Outre ces paramètres, en hévéaculture on tient également compte de l'ensoleillement. Par contre, il est à noter que les planteurs semblent peu se préoccuper des régimes de vent des régions, paramètre qui ne semble pas entrer dans la liste des critères à prendre en considération.

En matière de type de sol, on considère souvent l'hévéa comme peu exigeant. Néanmoins, son développement et sa productivité dépendent de la qualité du développement du système racinaire, de la disponibilité en eau et des nutriments. L'hévéa peut être planté aussi bien en terrain accidenté qu'en terrain plat. Du point de vue du prix d'établissement et de l'exploitation, les terrains plats ou à faibles pentes sont plus favorables car ils sont moins sujets à l'érosion. La profondeur du sol est un facteur important pour le développement du système racinaire de l'hévéa qui est à la fois pivotant et traçant (Thaler et Pagès, 1997; Roux et Pagès, 2000). Le développement des racines pivotantes en profondeur permet un meilleur ancrage de l'arbre et améliore les possibilités d'approvisionnement en eau en saison sèche.

La composition granulométrique qui intervient dans la structure du sol et dans sa capacité de rétention pour l'eau, est considérée comme la caractéristique physique la plus importante. Un sol argileux comprenant plus de 55% d'argile sur toute la hauteur du profil offre des conditions

très favorables à l'hévéa. Dans des conditions climatiques pas très marginales, une texture du sol argilo-sableuse (avec 25 à 40% d'argile) peut également convenir à la culture de l'hévéa. Cependant, une texture sablo-argileuse (avec 15 à 25 % d'argile) correspond à des conditions limites à l'hévéaculture. Il faut également noter que l'hévéa manifeste une certaine préférence pour des sols acides dont le pH varie entre 4,5 et 5,5 (Compagnon, 1986a; Perron et al., 2021).

1.1.2.3 De l'arbre au bois

Les organes porteurs de l'arbre que sont les racines, le tronc ou les branches, sont essentiellement constitués de bois issu de la croissance secondaire. Celle-ci est assurée par une couche de cellules situées sur toute la périphérie de la plante, appelé « cambium » ou « méristème secondaire ».

L'activité du cambium se caractérise par des productions de cellules vers l'intérieur (le xylème) et vers l'extérieur. Vers l'extérieur, les cellules se différencient pour donner les tissus de l'écorce (**Figure 1-2**), incluant le phloème (tissu conducteur de sève élaborée). En plus des tissus du suber ou écorce externe (partie inerte) et du liber ou écorce interne (partie vivante), le cambium de l'hévéa produit également les tissus du système laticifère vers l'extérieur (**Figure 1-3**). Le système laticifère est constitué d'un réseau de cellules spécialisées appelé cellules laticifères, issues de la différenciation des cellules du libère (ou écorce vivante). Le cytoplasme desdites cellules spécialisées constitue le latex produit par l'hévéa (Héban et De Fay, 1980). Les vaisseaux laticifères sont générés de façon rythmique à partir du cambium, en couches successives et concentriques et appelés manteaux laticifères. Des racines aux feuilles en passant par le tronc, les vaisseaux laticifères sont présents dans tous les tissus mous de l'hévéa mais seul le tronc présente le plus grand intérêt (Bouychou, 1963) pour la récolte du latex à l'échelle industrielle.

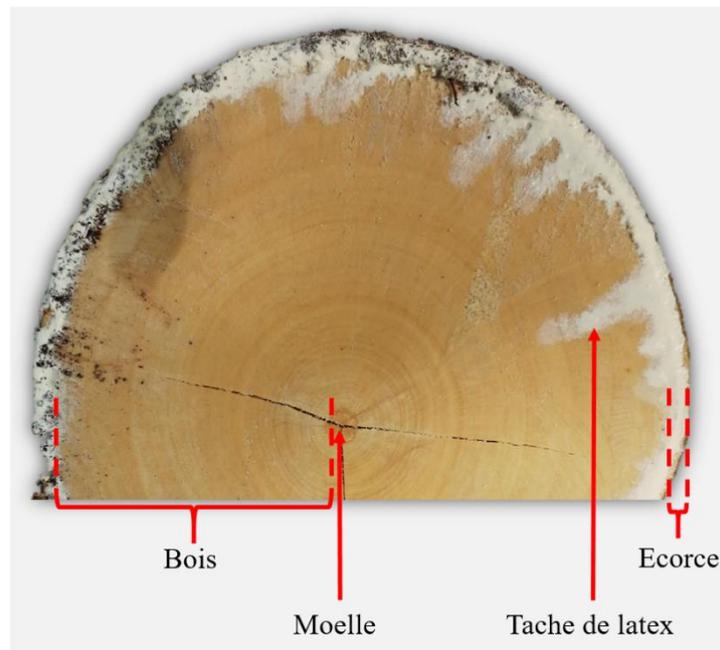


Figure 1-2: Section transversale du tronc d'hévéa. On distingue sur la figure l'écorce, le bois et la moelle ; les taches blanches de la périphérie de la section représentent le latex.

Les laticifères (**Figure 1-3**) font partie de la formation du liber, à la suite d'une différenciation spéciale des cellules générés par le cambium. Ils sont liés au tissu du liber dans leur développement et subissent le même vieillissement (Héban et De Fay, 1980). Ainsi, c'est dans les zones les plus proches du cambium que l'on retrouve les cellules laticifères les plus jeunes,

donc plus actifs. Une particularité à signaler chez l'*Hevea brasiliensis* est la direction générale du système conducteur et du système laticifère. On note une inclinaison des vaisseaux conducteurs et des vaisseaux laticifères de 3 à 5°, de la droite vers la gauche en allant de haut en bas (Bouychou, 1963; Compagnon, 1986b; Tran et al., 2016).

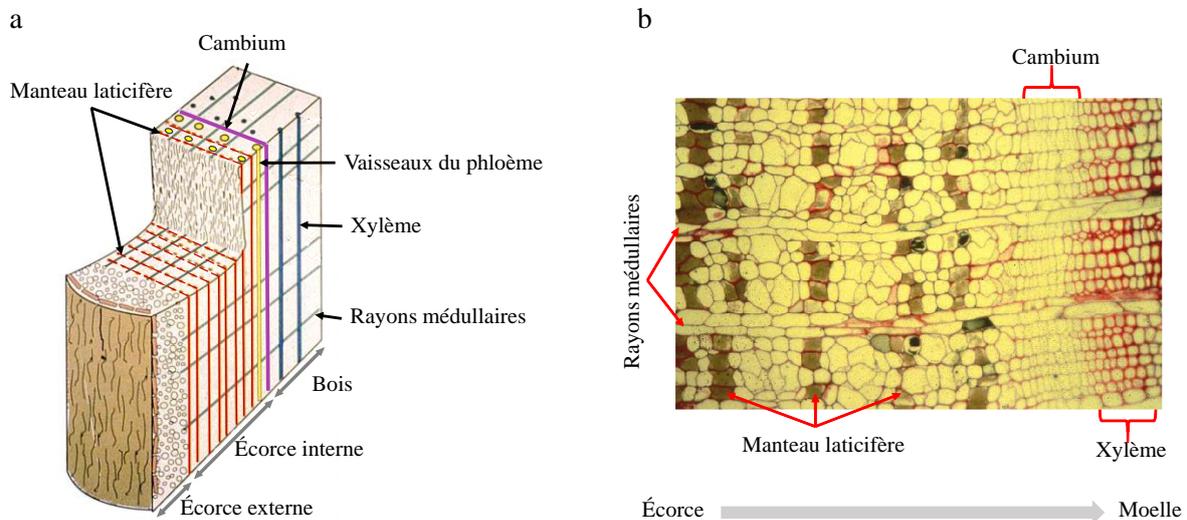


Figure 1-3: a. Schéma d'une coupe de tronc d'hévéa mature. Le tissu externe et interne sont représentés ; et on retrouve le xylème, le cambium (bande violette), le phloème et le manteaux laticifère en bande rouge (Jacob et al., 1994). b. Coupe transversale du tronc d'hévéa réalisée au microscope optique. On y distingue le xylème, le cambium, les manteaux laticifères en bande noire et les rayons médullaires (de Faÿ et al., 1989).

Vers l'intérieur, l'activité du cambium se caractérise par la production de cellules qui se différencient pour donner les tissus du bois (**Figure 1-2** et **Figure 1-3**), le xylème (tissus conductrice de sève brute). Le bois est un ensemble de tissus d'origine secondaire, à parois lignifiées issues du fonctionnement du cambium. Il remplit dans l'arbre des fonctions bien définies (Jodin, 1994; Wiedenhoef, 2010) :

- Fonction de conduction de la sève brute ascendante (par les vaisseaux du xylème) allant des racines jusqu'aux feuilles (siège de la photosynthèse) ;
- Fonction de stockage, de restitution, d'élaboration et de transformation chimique des substances ;
- Fonction de soutien et de résistance mécanique de la tige ;

C'est cette dernière fonction qui permet à l'arbre de résister à son environnement mécanique notamment aux nombreuses sollicitations du vent.

Le cambium produit de nouvelles couches de bois chaque année sous forme de cerne annuel ou anneau de croissance qui marque son fonctionnement saisonnier chez certaines espèces (Catesson and Lachaud, 1993; Callado et al., 2001). Ces cernes de croissance sont visibles à l'œil nu ou au microscope chez la plupart des espèces des zones et climats tempérés (avec des saisons bien marquées) : c'est l'échelle macroscopique d'observation du bois. Chez certaines espèces tropicales comme l'hévéa (**Figure 1-2**), la visibilité des cernes de croissance est beaucoup moins distincte voire impossible du fait de l'absence de saison marquée (Callado et al., 2001; Détienne, 1989; Détienne and Mariaux, 1977). Le bois qui forme des anneaux de croissance distincts, présentent trois schémas fondamentaux à l'intérieur d'un anneau de croissance : aucun changement dans la configuration des cellules à travers l'anneau ; une réduction graduelle du diamètre intérieur des éléments conducteurs du bois initial au bois final ; et un changement soudain et distinct du diamètre intérieur des éléments conducteurs à travers l'anneau. Ces schémas apparaissent aussi bien chez les résineux que chez les feuillus, mais

diffèrent dans chaque cas en raison des différences anatomiques distinctes entre les deux (Jodin, 1994; Wiedenhoef, 2010).

1.1.2.4 Structure générale du bois chez les feuillus

Le processus de formation du bois dans l'arbre (décrit dans la section précédente) fait de celui-ci un matériau très hétérogène et au comportement anisotrope. Les propriétés du matériau bois varient donc suivant trois directions privilégiées constituant les plans ligneux (**Figure 1-4a**) : le plan longitudinal, suivant l'axe de la tige ; le plan radial, perpendiculaire aux cernes de croissance ; le plan tangentiel, perpendiculaire aux deux précédentes directions. Généralement, on rencontre sur le plan ligneux les éléments suivants (**Figure 1-4b**) : les éléments de vaisseaux, les ponctuations, les fibres, les parenchymes et les rayons ligneux (Jodin, 1994).

Les éléments de vaisseaux sont des cellules spécialisées dans la conduction de la sève brute et sont présents seulement chez les feuillus. Les ponctuations peuvent être définies comme une discontinuité dans la paroi cellulaire donnant naissance à une ouverture. Les fibres servent à la conduction de la sève brute et au support mécanique de la tige. Ce sont des cellules mortes, dont les parois se sont fortement épaissies et lignifiées lors de la différenciation. Le parenchyme sert à l'entreposage et à la distribution des substances nutritives. Pour cela, sa paroi est peu lignifiée et abondamment ponctuée. Les cellules de parenchyme sont connectées entre elles par des ponctuations simples. Les rayons ligneux constituent des bandes radiales continues de cellules de parenchymes auxquelles peuvent être associés chez certaines espèces, des trachéides transversales et des canaux sécréteurs. Ils ont les rôles de conduction radiale et d'accumulation de réserves (Jodin, 1994; Jourez, 2010).

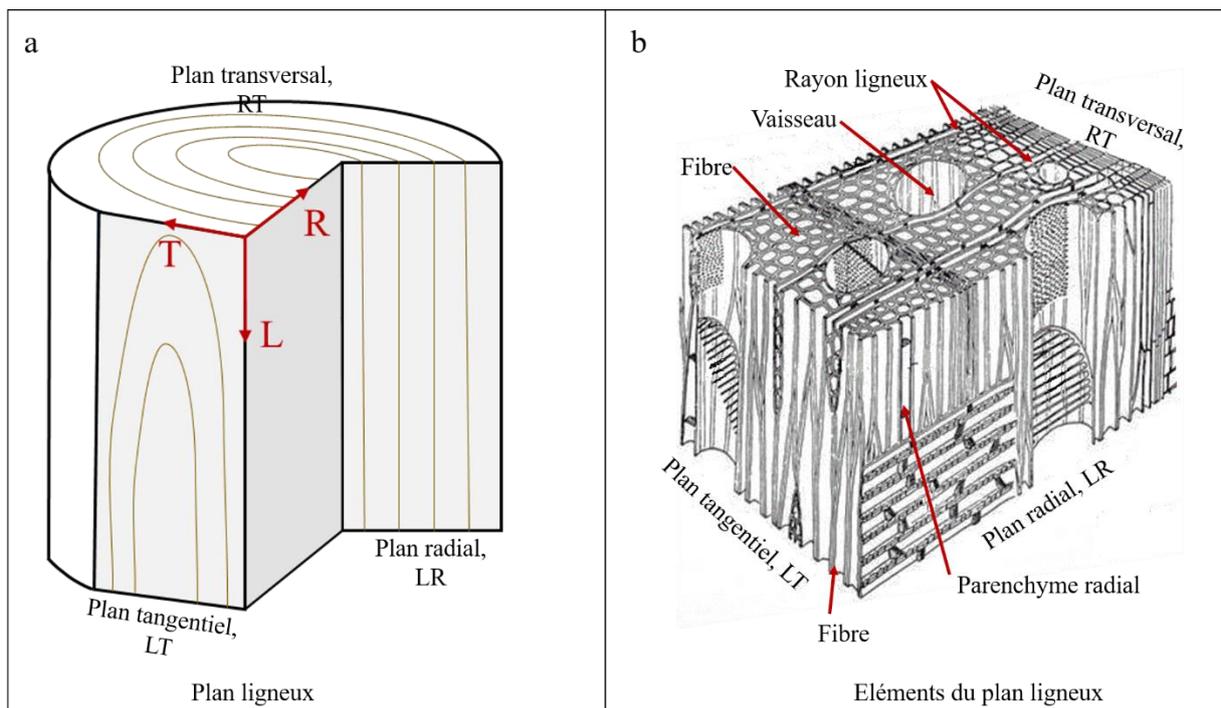


Figure 1-4: a. Direction de référence du matériau bois. La direction longitudinale L correspond à l'axe du tronc (de la branche, de la racine), la direction tangentielle T correspond à la tangente aux cernes de croissance et la direction radiale R correspond à la perpendiculaire aux directions L et T passant par le centre biologique de l'arbre (qui n'est pas forcément le centre géométrique). b. Structure tridimensionnelle générale des feuillus (schéma modifié d'après (Lecomte-Schmitt, 2014)).

1.1.2.5 Contraintes de croissance dans l'arbre et bois de réaction chez les feuillus

1.1.2.5.1 Contraintes de croissance

La croissance des arbres se fait par empilement et accumulation progressive de nouveaux éléments, soit à travers la formation de nouvelles portions de tige et de racine (croissance primaire), soit à travers l'épaississement des axes et le dépôt de nouvelles couches de bois et d'écorce (croissance secondaire). La maturation des cellules après différenciation (aboutissant à la formation de nouvelles couches) engendre des efforts internes que l'on appelle « contraintes de maturation » (Archer, 1987; Alméras et al., 2018). Elles résultent du fait que la cellule nouvellement formée tend à se rétrécir longitudinalement et à s'épaissir diamétralement lors de sa maturation (dépôts de couches cellulodiques lignifiées). Ces déformations sont bloquées par l'adhérence de la jeune cellule aux anciennes déjà rigidifiées. La nouvelle cellule se retrouve donc en précontrainte de tension suivant la direction longitudinale et de compression suivant la direction tangentielle (Fournier et al., 1991a). Les contraintes de croissance ne sont pas un problème pour l'arbre, mais plutôt un atout pour la croissance de l'arbre dans des environnements fluctuants. En effet, dans un tronc, on observe une distribution de contraintes résiduelles suivant les trois directions de références (**Figure 1-4a**). Longitudinalement (L), une contrainte de traction près de la périphérie se traduit par une compression au centre (**Figure 1-5**). Dans les directions transversales, on observe des tensions radiale (R) et tangentielle (T) au centre, et une compression T près de la périphérie (Fournier et al., 1991b; Constant et al., 2007; Gril et al., 2017). Du fait de la forte résistance du bois en traction longitudinale, cette répartition des contraintes de maturation contribue de façon significative à la résistance à la flexion des tiges. Elles permettent notamment à l'arbre de diminuer les efforts de compression L provoqués par l'oscillation de la tige sous l'effet du vent (Constant et al., 2007).

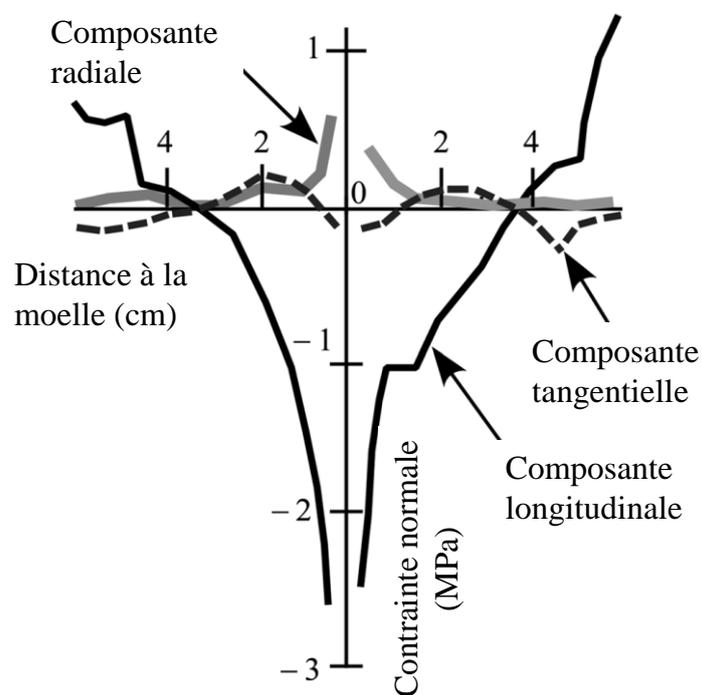


Figure 1-5: . Distribution des contraintes résiduelles de maturation dans une tige verticale bien équilibrée de Peuplier (d'après Okuyama cité dans (Gril et al., 2017)).

1.1.2.5.2 Bois de tension

Lorsqu'un arbre est dévié de sa position verticale, une distribution asymétrique de contrainte apparaît dans le bois (de part et d'autre de la tige) avec la maturation de la paroi cellulaire, c'est-à-dire la lignification et la formation de la paroi cellulaire secondaire (Archer, 1987; Fournier

et al., 1994; Clair et al., 2006). Pour répondre à ce stress, la réponse physiologique des feuillus est de former un bois de réaction, appelé « bois de tension », sur la face supérieure de la tige. Ce bois montre des propriétés particulières qui permettent la réorientation de la tige pour retrouver sa verticalité (**Figure 1-6**). Il est produit sur le côté supérieur de la tige inclinée, entraînant parfois une excentricité de la moelle (Ruelle, 2014). C'est le même mécanisme qui intervient lors des réorientations phototropiques : dans ce cas le bois de tension est produit du côté de la source de lumière. Cependant, tous les feuillus ne forment pas du bois de tension. Aiso et al (2014) ont notamment montré qu'il en existe qui forment du bois de réaction semblable au résineux (bois de compression). Macroscopiquement, sur une coupe transversale de tronc à l'état vert, le bois de tension est parfois d'apparence pelucheuse. La présence de bois de tension rend la surface des pièces de bois sciées très rugueuse et occasionne des déformations importantes lors du séchage (Jodin, 1994; Yamamoto et al., 2005).

La différence entre le bois de tension et le « bois opposé » peut varier d'une essence à une autre. Globalement, il n'a pas de différences systématiques dans la densité entre les deux types de bois. Le bois de tension a généralement un module d'élasticité plus élevé que le « bois opposé » mais son module de rupture est légèrement plus faible (Coutand et al., 2004; Yamamoto et al., 2005; Clair and Thibaut, 2014).

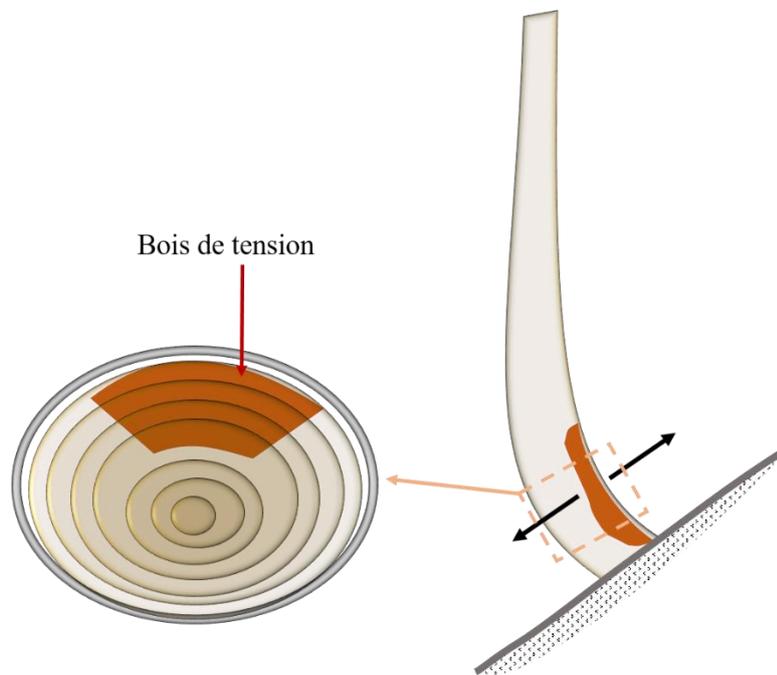


Figure 1-6: Localisation du bois de tension.

Sur le plan anatomique, le bois de tension diffère assez du « bois opposé ». S'il est difficile de généraliser, on peut tirer de grandes tendances. On y observe souvent une diminution du diamètre des vaisseaux et de leur fréquence à la surface d'un cerne. C'est au niveau des fibres que l'on observe les principales différences par rapport au « bois opposé » (Telewski, 1989; Jodin, 1994; Clair et al., 2006; Déjardin et al., 2010; Ruelle, 2014; Donaldson and Singh, 2016). Dans le bois de tension :

- Le pourcentage de fibre est plus élevé et leur diamètre est souvent plus faible. Néanmoins, leur longueur est plus grande et leurs parois sont plus épaisses avec un contour arrondi ;
- La paroi des fibres développe une couche « gélatineuse » (couche G) sur la face interne de la paroi (**Figure 1-7**). Cette couche est caractérisée par un angle de microfibrilles de

cellulose très faible, de l'ordre de 5° et une épaisseur égale ou supérieure à celle de la couche S2 de la paroi cellulaire du bois « normal » ;

- Trois types d'organisation de la paroi cellulaire du bois de tension sont possibles : S1+S2+S3+G ; S1+S2+G ; S1+G (**Figure 1-7**).

Du point de vue de la composition chimique, on observe une teneur en cellulose plus importante de 40 à 50% et une teneur en lignine plus faible. La couche G est constituée de 98% de cellulose, plus cristalline que dans le « bois opposé » (Donaldson et Singh, 2016; Ruelle, 2014) ; caractéristique lui conférant une rigidité très importante

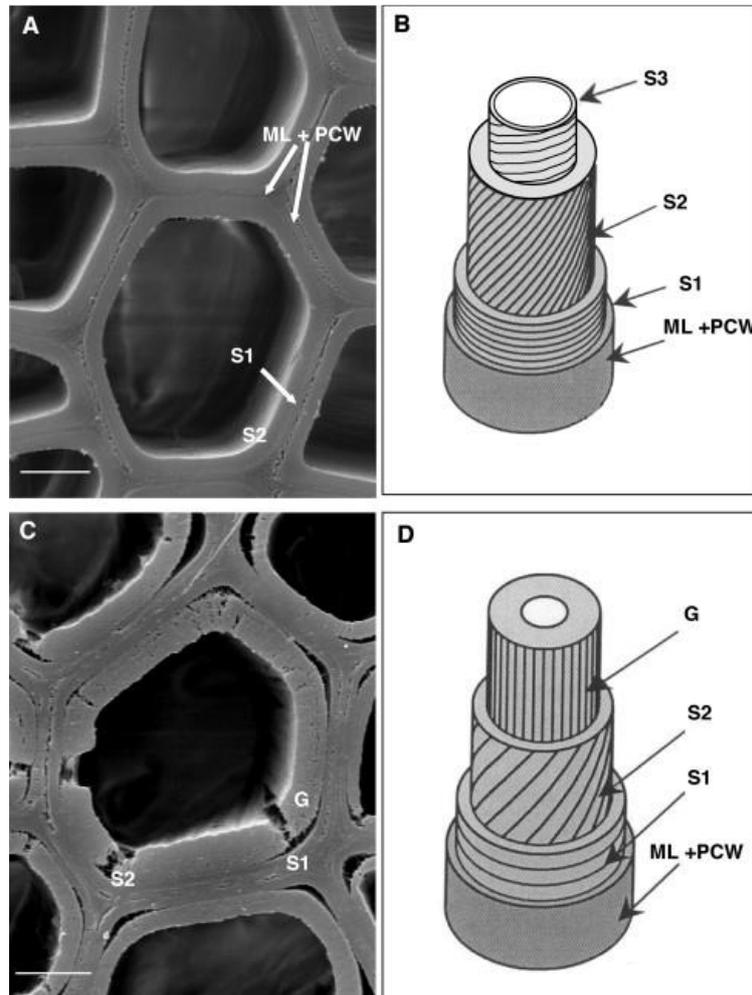


Figure 1-7: (A et B) Cas du bois « normal » ; (C et D) cas du bois de tension : développement de la couche G (Déjardin et al., 2010). (ML+PCW) représentent la lamelle moyenne et la paroi primaire de la fibre, (S1, S2, S3) les couches de la paroi secondaire. (G) correspond à la couche gélatineuse formée dans le bois de tension.

1.1.3 Exploitation du latex et conséquences physiologiques pour l'arbre

Le latex est le cytoplasme de cellule laticifère dans lequel se trouvent des particules de caoutchouc et qui a la particularité d'être renouvelable. C'est cette capacité à reconstituer en peu de temps le latex qui différencie l'hévéa de la majorité des plantes cultivées (Compagnon, 1986b). Le latex est un fluide visqueux contenu dans un réseau de vaisseaux laticifères (*voir Figure 1-3*) communiquant plus ou moins entre eux. L'incision de ces vaisseaux permet l'écoulement du latex vers l'extérieur : c'est la « saignée ». Elle consiste à effectuer une entaille

dite « encoche » dans l'écorce de l'arbre. Cette opération est répétée tout au long de l'année et durant toute la vie économique de l'arbre soit en moyenne 35 ans. La fréquence de saignée fait partie des caractéristiques du système de saignée (Compagnon, 1986b; Obouayeba et Boa, 1993).

La production de caoutchouc dépend fortement de la quantité de latex produite à chaque saignée, qui elle dépend de la durée de l'écoulement. Cet écoulement peut être affecté par divers hormones végétales telle que l'éthylène. En agissant sur les enzymes régulatrices de la coagulation, l'éthylène entraîne un écoulement prolongé de latex. Ainsi, le traitement à l'éthylène (sous forme d'éthéphon) du panneau de saignée de l'hévéa multiplie la production de latex de 1,5 à 2 fois (Gohet et al., 1996; Zhu et Zhang, 2009). Toutefois, la stimulation est à effectuer avec précaution. Des études sur le sujet ont en effet révélé des limites d'efficacité de la stimulation. Au-delà de ces limites, de graves dysfonctionnements physiologiques apparaissent pour l'arbre (Gohet et al., 1996).

La mise en exploitation à lieu lorsque 50% des arbres dans une parcelle ont atteint 50 cm de circonférence à 1 m du sol. Dès lors, il apparaît une compétition entre la production de latex et la croissance. Ainsi, la saignée force l'arbre à détourner une partie de ses ressources alimentaires au détriment de son fonctionnement normal (lorsque l'arbre perd du latex, il est forcé d'en synthétiser à nouveau) (Thaler et al., 2016). En physiologie, on dira que la saignée génère une nouvelle « force de puits ». Une des principales conséquences de la saignée est donc une réduction importante de la croissance des troncs (Silpi et al., 2006; Thaler, 2012). Silpi et al (2006) ont notamment constaté que durant une période de forte croissance (entre mi-juin et novembre), le déficit de croissance cumulé pouvait atteindre 80%. La saignée implique également des blessures répétées à l'écorce et parfois une blessure accidentelle des tissus plus profonds, comme le cambium lui-même. La saignée est donc une pratique traumatisante pour l'arbre et son impact négatif sur la croissance est assez connu. De ce fait, on peut questionner aussi l'impact de la saignée sur les propriétés du bois formé.

1.1.4 Propriétés mécaniques du bois

On s'intéresse particulièrement aux propriétés du bois vert qui permettent à l'arbre d'assurer sa fonction de soutien mécanique pour faire face aux perturbations mécaniques fluctuantes liées aux facteurs environnementaux, en particulier le vent.

1.1.4.1 Quelques notions de mécanique des milieux continus

On considère le matériau bois ici comme un milieu continu et homogène. Cette hypothèse de continuité implique que l'étude soit effectuée sur des volumes élémentaires suffisamment grands devant la structure cellulaire du bois et suffisamment grand devant les hétérogénéités.

Notion de déformation

Sous l'action d'un chargement mécanique, tous les matériaux subissent un changement de forme, de position et d'orientation entre un état initial (avant application de la charge) et un état final (après application de la charge). Les déformations caractérisent le changement de forme local en tout point du solide, indépendamment de sa nature et de ses caractéristiques de résistance (Dinwoodie, 1981; Guitard, 1987; Jodin, 1994; Charmet, 2005). A l'échelle microscopique, le changement de forme se caractérise par un changement de longueur et un changement d'orientation des liaisons atomiques. A l'échelle macroscopique, la distance géométrique entre deux points du solide est modifiée (contraction ou élongation) et les angles entre trois points du solide peut aussi être modifiée (cisaillement angulaire). Si on se place dans

un repère (x_R, x_T, x_L) , correspondant aux trois directions orthogonales de référence du plan ligneux, on peut définir en tout point le déplacement par le vecteur : $U = (u_R, u_T, u_L)$.

Dans le cadre des petites déformations, au cours du déplacement U , le solide subit des déformations locales définies par le tenseur des déformations linéarisées $\bar{\bar{\epsilon}}$ représenté ci-dessous par sa matrice associée (Guitard, 1987; Charmet, 2005) :

$$\bar{\bar{\epsilon}} = \begin{pmatrix} \epsilon_{RR} & \epsilon_{RT} & \epsilon_{RL} \\ \epsilon_{TR} & \epsilon_{TT} & \epsilon_{TL} \\ \epsilon_{LR} & \epsilon_{LT} & \epsilon_{LL} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u_R}{\partial x_R} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_R}{\partial x_T} + \frac{\partial u_T}{\partial x_R} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_R}{\partial x_L} + \frac{\partial u_L}{\partial x_R} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_R}{\partial x_T} + \frac{\partial u_T}{\partial x_R} \right) & \frac{\partial u_T}{\partial x_T} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_T}{\partial x_L} + \frac{\partial u_L}{\partial x_T} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_R}{\partial x_L} + \frac{\partial u_L}{\partial x_R} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_T}{\partial x_L} + \frac{\partial u_L}{\partial x_T} \right) & \frac{\partial u_L}{\partial x_L} \end{pmatrix}_{(x_R, x_T, x_L)} \quad (1.1)$$

Dans la matrice associée au tenseur des déformations linéarisées, les éléments diagonaux représentent les variations relatives de longueur dans les directions des axes du repère tandis que les éléments non diagonaux correspondent aux demi-variations angulaires. Compte tenu de la symétrie de cette matrice, on a : $\epsilon_{TR} = \epsilon_{RT}$; $\epsilon_{LR} = \epsilon_{RL}$ et $\epsilon_{LT} = \epsilon_{TL}$ (Dinwoodie, 1981; Guitard, 1987; Charmet, 2005). A partir des équations de la matrice précédente, on peut remonter au champ de déplacement U de l'ensemble des points du solide déformé.

Notion de contrainte

Lorsqu'un solide est soumis à l'action d'une sollicitation externe, il réagit selon le principe d'action-réaction. Les contraintes caractérisent donc l'état de sollicitation mécanique (effort internes) en tout point du solide, quel que soit sa nature et ses caractéristiques de résistance (Jodin, 1994; Charmet, 2005). Si le solide est soumis à une force \vec{F} (sur une surface S du solide), alors on définit la facette orientée $\vec{n}dS$ (avec \vec{n} le vecteur unitaire normale à cette facette) qui supporte une part $d\vec{F}$ de cette force. La réaction du solide sur chaque facette est représentée par le vecteur contrainte \vec{T} (densité surfacique de la force en un point O de la facette) défini par la relation suivante (Guitard, 1987; Jodin, 1994; Charmet, 2005) :

$$\vec{T}(O, \vec{n}) = \frac{d\vec{F}}{dS} \quad (1.2)$$

Les composantes du vecteur contrainte $\vec{T}(O, \vec{n})$ sont σ_{nn} suivant la direction \vec{n} , appelée contrainte normale, et σ_{nt} située dans le plan de la facette perpendiculaire à \vec{n} , appelée contrainte de cisaillement, et notée aussi τ . Le vecteur contrainte est également relié à l'état de contraintes du solide caractérisé par le tenseur des contraintes $\bar{\bar{\sigma}}$ (représenté par sa matrice associée 3×3) :

$$\vec{T}(O, \vec{n}) = \bar{\bar{\sigma}} \cdot \vec{n} \quad (1.3)$$

L'état de contraintes internes du solide est donc entièrement déterminé par la donnée des 6 composantes de la matrice associée au tenseur des contraintes. Ces composantes doivent toutefois satisfaire certaines conditions purement mécaniques qui traduisent le principe fondamental de la dynamique appliquée à un élément de volume dV (Guitard, 1987) :

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho \cdot f_i = \rho \cdot \gamma_i, \quad \text{avec } i \text{ et } j \text{ les directions des axes du repère} \quad (1.4)$$

Avec f_i les composantes de la densité massique d'effort extérieur et γ_i les composantes du vecteur accélération.

Comportement élastique linéaire et tenseur des rigidités : Loi de Hooke

L'expérience montre que si la déformation du solide est suffisamment faible, il reprend son état initial non déformé lorsqu'on supprime les efforts extérieurs ayant provoqué sa déformation. Dans ce cas, l'équation d'état du solide, traduisant les relations entre sollicitations et déformations, est linéaire. La loi de comportement mécanique traduit la proportionnalité du tenseur des contraintes et du tenseur des déformations. Elle est connue sous le nom de loi de Hooke et se traduit par la relation suivante (Chevalier, 1988; Guitard, 1987; Jodin, 1994) :

$$\vec{\sigma} = C. \vec{\varepsilon} \quad (1.5)$$

Avec C la matrice (6×6) associée au tenseur des rigidités $\bar{\bar{C}}$ (tenseur inverse du tenseur des complaisances élastiques $\bar{\bar{S}}$), $\vec{\sigma}$ et $\vec{\varepsilon}$ les vecteurs contraintes et déformations (6×1) respectivement.

Comme nous l'avons dit en introduction du paragraphe §1.1.4, les propriétés du bois sont fortement hétérogènes et anisotropes (voir **Figure 1-4**) (Jodin, 1994). Cependant, pour les études macroscopiques, on considère le « tronc idéal » comme un milieu continu, homogène et orthotrope cylindrique (Chevalier, 1988; Guitard, 1987). Ce caractère orthotrope du bois amène des simplifications dans la matrice des rigidités ou des complaisances, entre autres la présence des 0 qui avec la symétrie réduit la matrice à 9 composantes. Dans le repère d'orthotropie (R, T, L) la relation linéaire entre contrainte et déformation s'écrit de la façon suivante (Chevalier, 1988; Guitard, 1987) :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{RR} \\ \varepsilon_{TT} \\ \varepsilon_{LL} \\ \varepsilon_{TL} \\ \varepsilon_{LR} \\ \varepsilon_{RT} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_R} & \frac{-\nu_{TR}}{E_T} & \frac{-\nu_{LR}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & \frac{-\nu_{LT}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{RL}}{E_R} & \frac{-\nu_{TL}}{E_T} & \frac{1}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TL}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_{RR} \\ \sigma_{TT} \\ \sigma_{LL} \\ \sigma_{TL} \\ \sigma_{LR} \\ \sigma_{RT} \end{pmatrix} \quad (1.6)$$

E_R , E_T et E_L sont les modules d'élasticité dans les trois directions principales d'orthotropie. G_{TL} , G_{LR} et G_{RT} sont les modules de cisaillement et les paramètres ν_{ij} (avec $i, j = R, T, L$ et $i \neq j$) sont les coefficients de Poisson. En raison de la symétrie de la matrice, nous avons les relations suivantes :

$$\frac{\nu_{RT}}{E_R} = \frac{\nu_{TR}}{E_T}; \quad \frac{\nu_{RL}}{E_R} = \frac{\nu_{LR}}{E_L}; \quad \frac{\nu_{TL}}{E_T} = \frac{\nu_{LT}}{E_L} \quad (1.7)$$

En rhéologie, les relations entre état de déformation et état de contrainte constituent les lois de comportement du matériau (Guitard, 1987; Jodin, 1994). Pour représenter ces lois et caractériser les paramètres mécaniques d'un matériau, on utilise généralement des courbes contrainte-déformation. La courbe présentée par la **Figure 1-8** illustre cette relation.

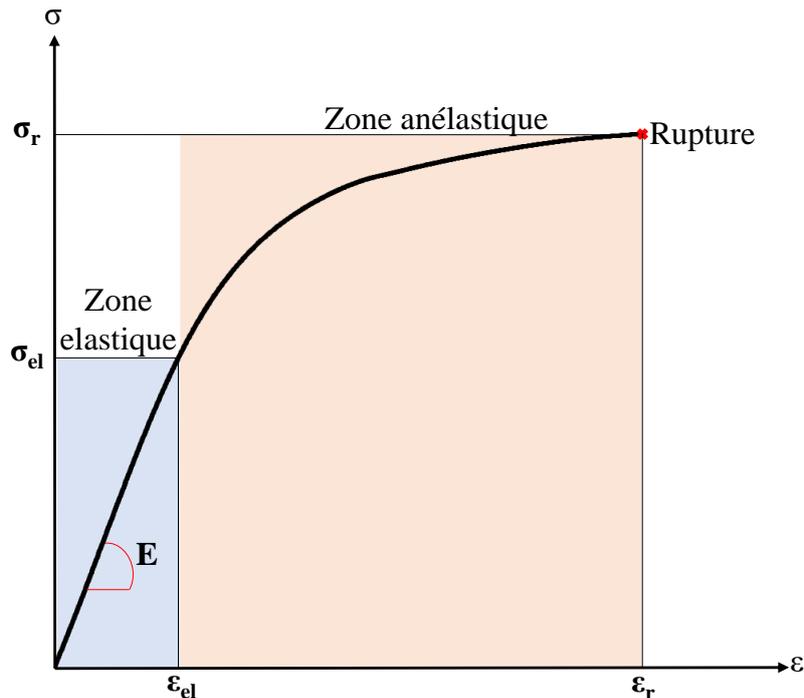


Figure 1-8: Schéma de courbe contrainte-déformation typique. σ correspond aux contraintes appliquées au matériau et ε à ses déformations. E représente le module d'élasticité longitudinal du matériau, σ_r sa contrainte à la rupture (avec ε_r la déformation associée à σ_r) et σ_{el} ; représente la contrainte élastique limite du matériau (avec ε_{el} la déformation associée à σ_{el}).

Sur cette courbe de contrainte-déformation, nous pouvons identifier deux grandes zones caractéristiques du comportement mécanique du matériau.

La première zone dite 'zone élastique' (ou zone de déformation élastique) est linéaire. Elle est caractérisée par une pente qui représente le module d'élasticité ou module d'Young E . Ce module rend compte de la rigidité du matériau dans le sens de la sollicitation externe. Cette zone élastique est également caractérisée par la limite de proportionnalité entre la contrainte et la déformation, représentée par deux paramètres : la contrainte de limite élastique σ_{el} et la déformation limite élastique ε_{el} . Ces paramètres marquent la limite entre le domaine élastique et la seconde zone de la courbe (**Figure 1-8**) : la 'zone plastique' (Guitard, 1987; Jodin, 1994).

La zone plastique est non linéaire et se traduit par une déformation irréversible du matériau sans fissuration. L'amplitude de déformation dans la zone plastique (d'un matériau ($\varepsilon_r - \varepsilon_{el}$)) renseigne sur la nature de sa rupture. Si la différence entre déformation limite élastique et déformation à la rupture est grande, alors la rupture est dite « ductile ». Si elle est faible, la rupture du matériau est définie comme « fragile » (Guitard, 1987; Charmet, 2005) ou quasi-fragile. Cette rupture est caractérisée par différents paramètres mécaniques, notamment : la résistance à la rupture σ_r (équivalent à la contrainte maximale avant la rupture), la déformation à la rupture ε_r (déformation maximale engendrant la rupture) et l'énergie de rupture.

Notion de viscoélasticité

Le bois vert est un matériau dont le comportement est viscoélastique (comportement élastique différée). Autrement dit, sa réponse à une sollicitation dépend de la vitesse d'application de cette dernière d'une part ; d'autre part après décharge, il retourne à l'état initial non déformé de manière non instantanée. Dans le cadre des petites déformations, lorsqu'un matériau viscoélastique subit une sollicitation, on observe une réponse élastique instantanée, suivie d'une

réponse retardée ou différée qui temps à se stabiliser après un temps caractéristique (Bardet et Gril, 2002; Husson, 2009). Ce caractère doit être pris en compte lors des essais, en adaptant par exemple la vitesse de chargement ou de déchargement pour limiter les effets de la viscoélasticité qui peuvent rendre complexe la mesure des propriétés mécaniques tel que le module d'élasticité (Bardet et Gril, 2002).

Les lois de comportement décrites précédemment, caractérisées par divers paramètres mécaniques (module d'élasticité, limite élastique...) sont intrinsèques au matériau. Dans le cas du bois, elles sont fortement liées à la structure anatomique et chimique (nature des polymères constitutifs des parois) du bois qui comme nous l'avons dit précédemment est très variable.

1.1.4.2 Déterminants affectant les propriétés mécaniques du bois

Les propriétés mécaniques du bois dépendent beaucoup de sa structure et elles sont sensibles à la variation de son état physique. Parmi ces influences, nous avons d'une part des paramètres structuraux : la densité (caractéristique de la quantité de matière), l'angle des microfibrilles (paramètre de structure pariétale), l'angle du fil (orientation longitudinale des fibres par rapport à l'axe du tronc) ; d'autre part des paramètres chimiques (exemple : la teneur en lignines). Par ailleurs, les propriétés du bois sont fortement modulées par des paramètres environnementaux comme l'humidité relative et la température de l'air ambiant, dont dépend la teneur en eau du bois. Le bois est en effet un matériau fortement hygroscopique capable d'absorber une grande quantité d'eau, laquelle se trouve principalement sous deux formes : l'eau liée contenue dans les parois cellulaires et l'eau libre contenue dans les lumens cellulaires. Les variations de la teneur en eau au-dessus du point de saturation des fibres¹ (PSF) impactent principalement la quantité d'eau libre et n'ont alors pas d'incidence sur les propriétés physique et mécanique du bois vert. Par contre, des variations comprises entre l'état anhydre et le PSF impactent la quantité d'eau contenue dans les parois et influencent alors le comportement du bois (Guitard and El Amri, 1987). Ajoutons à cela que des hautes températures (au-delà de 85°C) affectent fortement le comportement du bois notamment sa flexibilité. Des essais en conditions ambiantes (et à très court terme) n'ont pas ces effets sur le comportement du bois (Navi and Heger, 2005). On ne s'intéresse donc pas à ces facteurs de variabilité.

1.1.4.2.1 La masse volumique ou densité et l'infradensité

Dans l'étude du matériau bois, la densité ρ (ou masse volumique) est un paramètre important puisqu'il rend compte d'une part de la quantité de matière et de la porosité d'un échantillon de bois. Il est un bon indicateur de la rigidité longitudinale et de la résistance du bois lorsque l'on veut comparer des bois d'essences différentes (Guitard et El Amri, 1987; Yang et Evans, 2003; Clair et Thibaut, 2014). Par exemple, les travaux de Yang et Evans (2003) ont montré que la densité est responsable d'environ 81% des variations du module d'élasticité et du module de rupture chez l'Eucalyptus.

La densité est un paramètre physique qui peut varier au sein d'un même arbre, entre cernes de croissance (Albuquerque et al., 2016; De Mil et al., 2018) et de la moelle à la périphérie du tronc (Thibaut et al., 1997; Plourde et al., 2015; Zue Ondo et al., 2021). Une loi statistique a été développée par Guitard et El Amri (1987) pour estimer la valeur des composantes macroscopiques du tenseur des rigidités du matériau bois chez un feuillu. La figure ci-dessous

¹ Le point de saturation des fibres ou PSF désigne la teneur en humidité en-dessous (généralement autour de 30%) de laquelle le bois subit des changements de dimension, et donc des variations de propriétés physique et mécanique. Chez l'hévéa le PSF est d'environ 24% (Gérard et al., 2011).

illustre cette loi pour l'estimation des modules d'élasticité suivant les directions des axes d'orthotropie (Guitard and El Amri, 1987).

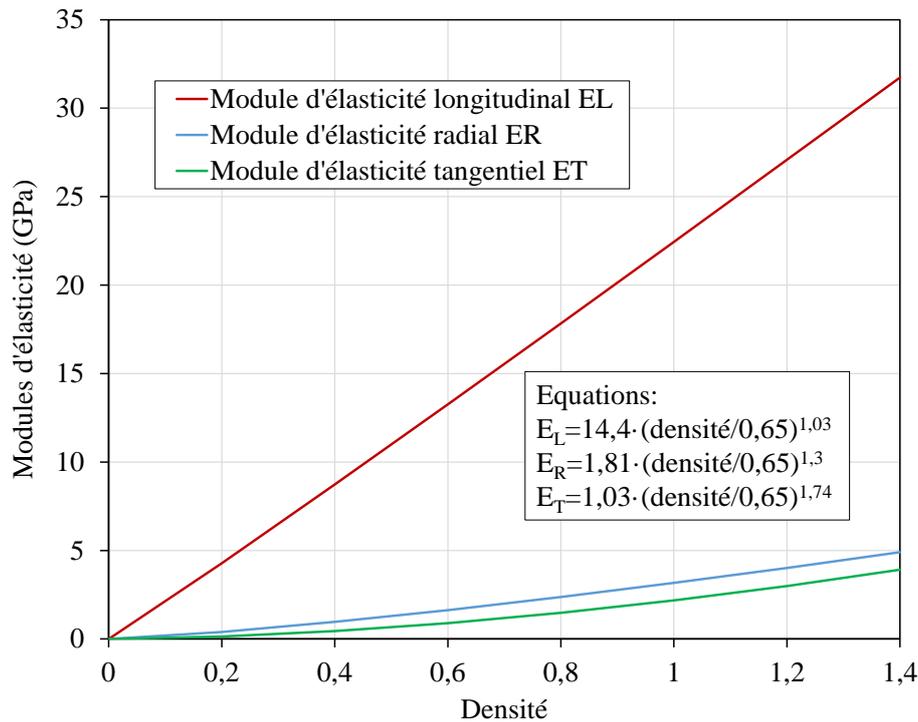


Figure 1-9: Relation entre densité et modules d'élasticité du bois à 12% d'humidité relative

La densité définie précédemment est toujours déterminée à un taux d'humidité donné de l'échantillon considéré (à cause de l'hygroscopicité du bois). Il existe des formules empiriques reliant la densité à l'état anhydre ρ_0 (rapport entre masse anhydre et volume anhydre), la densité à un taux d'humidité w notée ρ_w (Kollmann et Côté, 1968; Guitard, 1987). Pour des taux d'humidité allant de 0 à 25%, Kollmann et Côté (1968) ont proposé la relation suivante :

$$\rho_w \approx \rho_0 \cdot \frac{1 + w}{1 + 0,84 \cdot \rho_0 \cdot w} \quad (1.8)$$

Comme le montre l'équation 1.8, la densité du bois est fortement dépendante de sa teneur en eau. Cette dernière n'est de ce fait pas très pertinente dans l'étude du bois à l'état vert. Aussi pour s'affranchir des variations hydriques, on utilise très souvent « l'infradensité » (ID ou ρ_i). L'infradensité est obtenue à partir de la relation ci-dessous :

$$ID = \frac{\text{Masse anhydre}}{\text{Volume saturé}} \quad (1.9)$$

Dans le cas du bois vert, l'infradensité (ID ou ρ_i) est plus pertinente que la densité, car indépendante des variations hydriques. Elle est notamment utilisée par les forestiers pour déterminer la production de masse sèche d'une forêt (Thibaut et al., 1997). L'infradensité représente la quantité de matière sèche dans un volume donné : c'est le rapport de la masse sèche d'un échantillon de bois et de son volume saturé en eau. L'infradensité peut être liée à la densité à l'état anhydre ρ_0 par la relation suivante (Kollmann et Côté, 1968) :

$$ID \approx \rho_0 \cdot \frac{1}{1 + 0,28 \cdot \rho_0} \quad (1.10)$$

1.1.4.2.2 L'angle des microfibrilles (AMF)

Les microfibrilles de cellulose au sein de la paroi cellulaire ont une direction privilégiée dans les couches S1, S2 et S3 (**Figure 1-7**). Dans une couche, elles forment des hélices parallèles entre elles. L'angle formé par la tangente à une hélice avec la direction de la fibre est appelé angle des microfibrilles (AMF) (Jourez, 2010). Cet angle peut varier entre 30° et 50° pour les fibres de bois initial et entre 15° et 30° pour les fibres de bois final (Navi et al., 1995).

L'orientation des microfibrilles dans la paroi conditionne fortement la rigidité de cette dernière et par conséquent celle du bois (Barnett and Bonham, 2004). Tout comme la densité du bois, l'AMF est un facteur clef, indépendant de la densité, pour l'estimation de la résistance et de la rigidité du bois (Navi et al., 1995; Yang and Evans, 2003; Barnett and Bonham, 2004; Xu and Liu, 2004; Fournier et al., 2013). La **Figure 1-10** présente une illustration de la corrélation entre module d'élasticité et AMF, donné par Navi (1995).

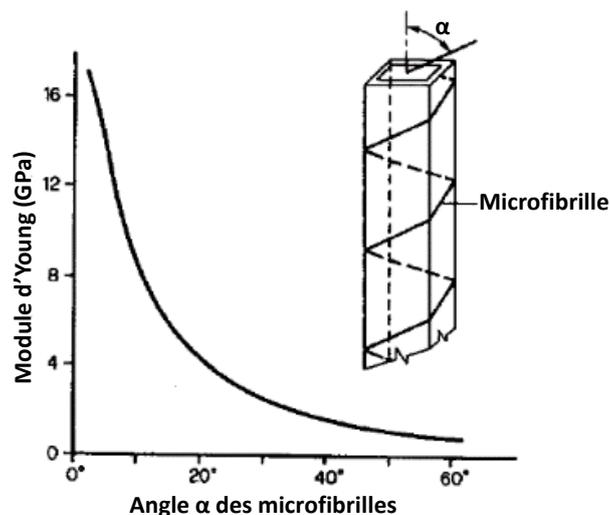


Figure 1-10: Variation du module d'élasticité longitudinal d'une fibre en fonction de l'angle des microfibrilles, d'après Navi (1988) cité dans (Navi et al., 1995). L'AMF est représenté par α sur la figure.

D'autres modèles plus ou moins complexes permettent d'estimer l'influence de l'AMF sur le module d'élasticité de la paroi et du tissu ligneux. Ainsi, la rigidité des tissus du bois peut être vue comme une fonction de l'AMF, de la densité du bois et de la rigidité de la paroi cellulaire, selon l'équation suivante (Xu et Liu, 2004; Fournier et al., 2013):

$$\frac{E_L}{\rho_0} = \frac{E_L^{\text{paroi}}}{\rho_{\text{paroi}}} \cos^4(\text{AMF}) \quad (1.11)$$

Avec E_L le module d'élasticité longitudinal du bois et ρ_0 sa densité ; E_L^{paroi} le module d'élasticité longitudinal de la paroi cellulaire et ρ_{paroi} sa densité.

D'après les travaux de Yang et Evans (2003) sur l'eucalyptus, l'AMF explique à lui seul 87% et 82% des variations du module d'élasticité et du module de rupture respectivement, pour cette essence. Ces derniers soulignent néanmoins qu'au-delà de 16°, une augmentation de l'AMF de cette essence ne semble pas entraîner une autre diminution significative du module d'élasticité (Yang et Evans, 2003).

L'AMF est souvent utilisé conjointement avec la densité pour prévoir les variations du module d'élasticité. Ainsi, une augmentation de la densité combinée avec une diminution de l'AMF engendre un bois plus rigide et plus résistant. Inversement, la combinaison d'une densité faible avec un AMF élevé engendre un bois plus flexible (déformation à la rupture plus élevée) (Evans

et Elic, 2001; Yamamoto et Kojima, 2002; Yang et Evans, 2003; Salmén et Burgert, 2009; Fournier et al., 2013).

Ainsi, l'analyse de ces paramètres de structure anatomique (densité et AMF) est indispensable pour la compréhension du comportement mécanique du bois, mais plus globalement pour la compréhension du comportement mécanique des arbres face à la rupture du tronc (Fournier et al., 2013; Telewski, 2016).

1.2 La casse au vent des arbres et l'hévéaculture

La biomécanique de la casse au vent a fait de très gros progrès dans les dernières décennies, que ce soit dans le domaine des arbres forestiers ou des arbres urbains (Chiba, 2000; Moore et Gardiner, 2001; Peltola, 2006). Dans le cas des arbres urbains (parc et alignements), ces méthodes sont même appliquées par des bureaux d'études pour effectuer des expertises opérationnelles (Wessolly, 1991; Dellus, 2004). Les études dans ce domaine ont conduit à l'élaboration de plusieurs modèles de prévention de risque de dommage par le vent. Une bonne synthèse de ces modèles a été produite par Gardiner et al (2008) et Hale et al (2015). Plus récemment, Dupond (2016) a proposé un nouveau modèle de prévention du risque, qui intègre : (i) un nouveau modèle statistique du vent turbulent au sommet de la canopée pour mieux tenir compte de la rafale de l'écoulement, un modèle d'arbre simple pour tenir compte du mouvement pendant le processus de rupture des arbres ; (ii) un couplage entre les modèles du vent et des arbres pour prédire la probabilité de dommages aux arbres au niveau du peuplement.

L'analyse biomécanique du risque de casse se décompose en deux domaines, à savoir :

- La mécanique de l'écoulement du vent dans le couvert qui détermine les propriétés du profil de vent qui va impacter un arbre donné, compte tenu du vent incident mais aussi des conditions du couvert ;
- La biomécanique du chargement mécanique de l'arbre et de la rupture de son bois en un point donné, conduisant à la casse ;

Dans le cadre de notre travail, on s'intéressera uniquement à la biomécanique du chargement mécanique de l'arbre et de la rupture.

En amont de toute étude, un point important est de savoir si la casse a lieu de manière quasi statique (une rafale un peu plus forte vient dépasser le seuil de résistance et induire la casse) ou si elle fait intervenir des phénomènes cumulatifs de fatigue ou dynamique de résonances (Rodriguez et al., 2008). Pour la casse des tiges, le fait d'une casse en hauteur pourrait suggérer une casse en résonance de tige. Toutefois les données accumulées sur les espèces forestières (Schindler et Mohr, 2019) et l'observation d'une tempête sur une plantation d'Hévéa (Clément-Demange com. pers.) conduisent à repousser l'hypothèse d'un effet important de la dynamique et des phénomènes de résonance.

1.2.1 Profil de vent dans un couvert forestier

La connaissance de la dynamique de l'écoulement dans le couvert, et donc des types de profil de vent, renseignent sur la répartition de la charge due au vent dans le peuplement. Cet écoulement est directement lié aux caractéristiques du peuplement et de son couvert (Mueller et al., 2014; Dupont, 2016; Gardiner et al., 2016).

Le facteur déterminant de la nature du vent près de la surface de la terre est la surface elle-même. Le profil vertical de la moyenne temporelle de la vitesse horizontale de vent au-dessus de la surface est déterminé par la rugosité de la surface et la stabilité de l'atmosphère. Dans une

atmosphère neutre (où l'air n'a pas tendance à s'élever ou à revenir à sa position initiale lors de son déplacement vertical), le profil de vent moyenné dans le temps est donné par la relation suivante (Gardiner et al., 2016):

$$U(z) = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) \text{ pour } z > d + z_0 \quad (1.12)$$

où u_* est la vitesse de friction, $k = 0,4$ est la constante de Von Karman, z est la hauteur au-dessus de la surface, d est le déplacement dans le plan zéro et z_0 est la rugosité aérodynamique. La rugosité aérodynamique est fonction du type de surface sur laquelle l'air circule et peut varier d'environ 0,02 m pour l'herbe jusqu'à 5 m pour les grandes forêts (Gardiner et al., 2016).

Dans la région située immédiatement au-dessus du couvert (couche de surface), l'écoulement est affecté de façon mesurable par les variations locales de la surface de la canopée. La couche de surface (CS) s'adapte alors aux changements et des transitions prenant place dans la couche limite interne (CLI). Il se crée alors, de façon progressive dans la CLI, une couche d'équilibre (CE) adaptée à la nouvelle surface (Mueller et al., 2014; Gardiner et al., 2016).

Le profil de vent moyen au-dessus de la canopée peut toujours être approximé par le profil logarithmique représenté par l'équation 1.12, même dans la couche de surface. Ce qui n'est pas le cas à l'intérieur de la canopée. Le profil à l'intérieur de la canopée est plus complexe et dépend fortement de la densité de la plantation et de la taille des houppiers des arbres dans le peuplement. Néanmoins, on peut ajuster approximativement le profil de vitesse à une fonction exponentielle de la forme suivante (Dupont, 2016; Gardiner et al., 2016) :

$$U(z) = U_h \cdot e^{x_e(1-z/h)} \quad (1.13)$$

où U_h la vitesse du vent dans le couvert, h la hauteur du couvert et x_e un coefficient d'extinction qui augmente avec la densité de la surface foliaire.

1.2.2 Modélisation de la charge du vent sur l'arbre : coefficient de sécurité

De grandes avancées ont été réalisées dans les domaines de la modélisation de la force du vent appliquée sur les arbres et de l'estimation de coefficients de sécurité (voir §1.2), tant au plan métrologique que de la modélisation intégrative, seule à même de prendre en compte la combinaison de facteurs impliqués et de définir leur importance relative (Petty and Swain, 1985; Colin et al., 2009; Eloy et al., 2017). La mécanique du chargement mécanique de l'arbre et de la rupture peut se décomposer en deux parties :

- L'estimation du moment fléchissant des efforts extérieurs, qui se décompose en un moment lié au vent et un moment lié au poids de la couronne (Papesch et al., 1997; Hale et al., 2012);
- L'estimation de la résistance mécanique du tronc (et/ou du système racinaire), qui fait intervenir les propriétés géométriques et intrinsèques du tronc (Fournier et al., 2013).

Le vent s'exerce principalement sur le houppier. En résumant l'action du vent à celle d'un écoulement d'air stationnaire qui induit des forces dites « de traînée » directement proportionnelles au carré de la vitesse moyenne du vent U et à la surface apparente du houppier A (projection du houppier dans le plan perpendiculaire à la direction d'écoulement du vent). Les forces de traînée mettent ainsi en jeu les caractéristiques du houppier par la surface de houppier interceptée et par le coefficient de traînée qui représente l'efficacité d'absorption de la quantité de mouvement du houppier. Dans sa forme la plus simple, ces forces de traînée sont données par la relation suivant (Wessolly, 1991; Gardiner et al., 2016) :

$$F_z = \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{air}} \cdot C_d \cdot A \cdot U^2 \quad (1.14)$$

où ρ_{air} est la densité de l'air et C_d le coefficient de traînée, qui peut varier entre 0,15 et 0,35 pour des arbres adultes (Wessolly, 1991). Dans cette action du vent, le houppier joue ainsi le rôle d'une « voile » supportée par un « mât encasté » formé par le tronc et son ancrage racinaire (Fournier et al., 2015). L'action est d'autant plus importante que le houppier est grand, avec un fort déport vers le haut.

Les forces de traînée sont transmises dans le tronc et les racines où elles génèrent un moment fléchissant (**Figure 1-11**). L'inclinaison de la tige induite par les forces de traînée génère un moment supplémentaire dû à la force de gravité du houppier $P = m \cdot g$; avec m (kg) la masse du houppier et g (m/s^2) la constante gravitationnelle. Le moment fléchissant total M résultant de toutes ces forces est donné par la relation suivante (Papesch et al., 1997; Chiba, 2000; Moore and Gardiner, 2001; Peltola, 2006) :

$$M(z) = -F_z \cdot (z_F - z) - P \cdot v_P \quad (1.15)$$

Avec z_F la hauteur de poussée du vent et v_P le déplacement horizontal (qui joue le rôle de bras de levier pour la force de gravité P du houppier) du centre de poussée. Le moment fléchissant M entraîne la rotation de la section du tronc, ce qui se traduit par une déformation de ladite section : $\varepsilon = yC$, avec y la distance du point considéré à la ligne neutre dans la section et C la courbure locale de la tige ; $C = d\theta/ds$, avec θ la rotation et s l'abscisse curviligne. Cette déformation génère un moment interne local dans la section, moment qui tend à s'opposer à la rotation de la section et donc au moment fléchissant M des forces extérieures (**Figure 1-11**). Pour une section élémentaire de surface dS , le moment interne dM_{int} qui s'oppose au moment fléchissant est défini comme suit (Timoshenko, 1955; Niklas, 1992) :

$$dM_{\text{int}}(y, z) = y \cdot \sigma \cdot dS = E \cdot C \cdot y^2 \cdot dS \quad (1.16)$$

Avec $\sigma = E \cdot \varepsilon = E \cdot yC$, la contrainte dans la section et $E = E_L$ le module d'élasticité longitudinal du bois, supposé homogène dans la section. Le moment interne total est obtenu en sommant, sur toute la surface de la section, les moments internes élémentaires. Ceci se traduit par la relation :

$$M_{\text{int}}(y, z) = E \cdot I \cdot C, \quad \text{avec } I = \int_S y^2 dS \quad (1.17)$$

où I est le moment quadratique de la section. L'équilibre statique du tronc impose l'égalité entre le moment des efforts extérieurs M et le moment des efforts internes M_{int} , autrement dit : $M = -M_{\text{int}}$ (Timoshenko, 1955).

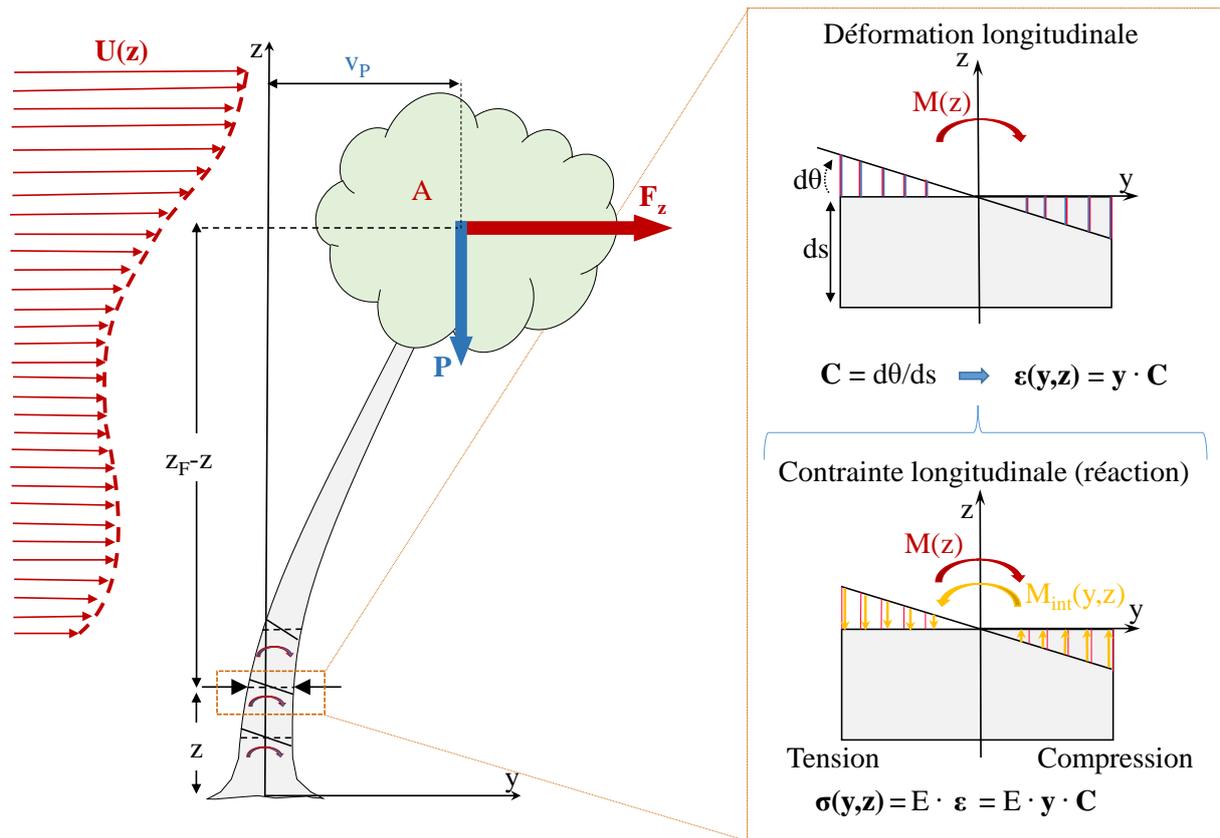


Figure 1-11: Schématisation de l'action du vent sur l'arbre et sa réaction.

On peut ainsi déduire de ce qui précède la relation entre le moment fléchissant M et la contrainte de flexion σ à la périphérie du tronc, qui se traduit par la relation suivante :

$$\sigma = \frac{M}{I} \cdot y \quad (1.18)$$

Cette expression de la contrainte ne tient pas compte de la distribution de la contrainte de croissance préexistante qui peut s'ajouter, en particulier dans le cas de la présence de bois de tension (Gril et al., 2017).

Les équations 1.16 et 1.17 permettent de mettre en évidence trois paramètres indispensables dans l'analyse biomécanique de la résistance du tronc : le moment quadratique I , le module d'élasticité E et leur produit, la rigidité EI (Telewski, 1989; Niklas, 1992; Fournier et al., 2013). La rigidité, évaluée à l'échelle du tronc, caractérise sa capacité à se déformer. Le moment quadratique d'une section du tronc caractérise la rigidité que lui confère sa géométrie. Pour une section du tronc parfaitement circulaire de diamètre D , on a $I = \pi \cdot D^4 / 64$; le module d'élasticité caractérise la rigidité intrinsèque du matériau.

A partir de l'équation 1.16, on peut définir un coefficient de sécurité (CS) de l'arbre qui permet d'avoir une idée de situation face au vent (Niklas, 2000; Fournier et al., 2015; Goodwin, 2021) :

$$CS = \frac{\sigma_r}{\sigma} \quad (1.19)$$

Avec σ_r la résistance du bois vert et σ la contrainte engendrée par le vent. Afin de tenir compte des nœuds et autres singularités (qui jouent un rôle important dans la mesure de la résistance), il conviendrait de mesurer cette résistance sur de grandes dimensions ou directement sur l'arbre entier (Fournier et al., 2015). CS compare la contrainte maximale σ habituellement perçue par

le tronc dans le bois périphérique, à la résistance intrinsèque du bois vert. Il a le sens suivant : plus CS est grand ($\sigma_r > \sigma$), plus on s'éloigne de l'état critique $CS = 1$ où la force supportée est égale à la force limite de rupture. La rupture est atteinte lorsque CS devient petit, c'est-à-dire $\sigma_r < \sigma$. Ce calcul de coefficient de sécurité (très connu dans le domaine du génie civil) est utilisé dans plusieurs modèles semi-mécanistes d'évaluation du risque de dommage dû aux tempêtes (Gardiner et al., 2008).

1.2.3 Les différents types de dommages liés au vent dans les plantations d'hévéas : effet sur les peuplements

1.2.3.1 Les types de dégâts dans les plantations d'hévéas

Le risque de dommage causé par le vent est commun aux forêts naturelles et aux plantations ; et donc à l'hévéaculture. L'hévéa de plantation est un arbre très sensible aux dommages causés par les facteurs climatiques tels que les tempêtes. L'importance de ces dégâts peut être considérable et générer d'énormes pertes de production, à l'exemple d'un typhon en 1989 sur l'île de Hainan qui a causé la destruction de plus d'un million d'arbres, soit plus de 2000 hectares (Nicolas, 1990). On distingue généralement deux types de dégâts dus au vent :

- Le chablis (**Figure 1-12a**) caractérisé pas le déracinement complet de l'arbre. Selon Nicolas., (1990), dans ce cas, la cause principe est soit la présence d'une maladie de racines (*Fomes lignosus*), soit un développement limité du pivot (défaut d'enracinement) ;
- Le volis (**Figure 1-12b**) caractérisé par une rupture de la tige et une perte partielle ou totale de la couronne.

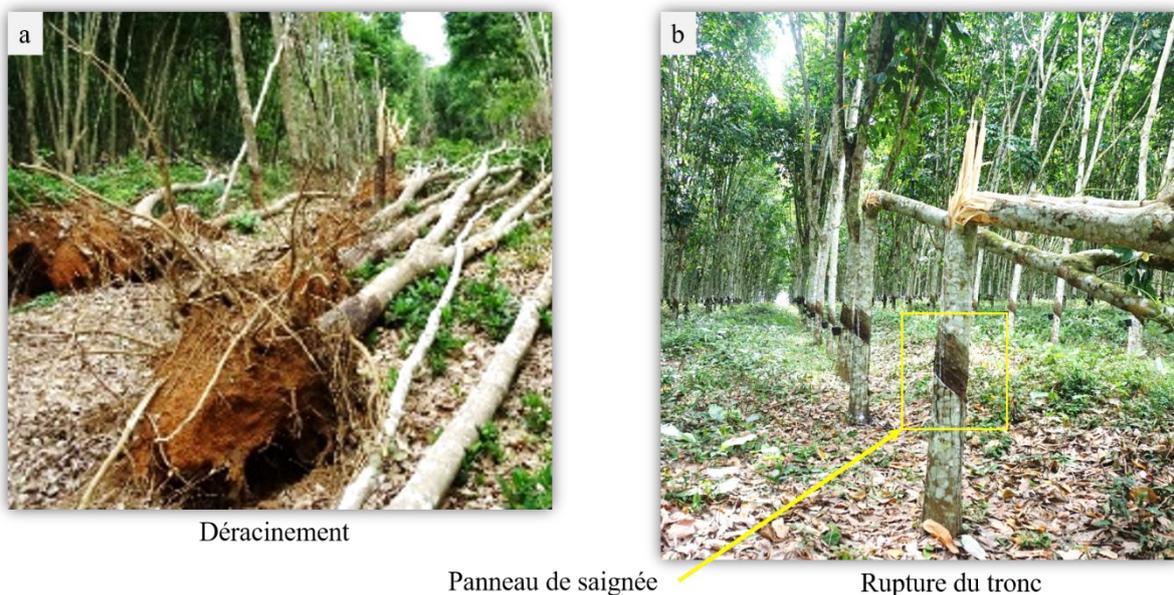


Figure 1-12: Exemple de dommages causés par le vent dans les plantations d'hévéas en Côte d'Ivoire. **a.** Chablis, avec un exemple d'effet « domino ». **b.** Volis, avec rupture au-dessus du panneau de saignée.

Une observation marquante sur le volis des hévéas de culture concerne la localisation de la rupture qui varie mais reste généralement située au-dessus du panneau de saignée (**Figure 1-12b**) au-delà de 1,3 m (Nicolas, 1990; Clément-Demange et al., 1995b). Pour les événements de casse au vent des arbres, il convient de distinguer deux régimes à savoir (Clément-Demange et al., 1995b, 1995a) :

- Les casses régulières (annuelles) qui entraînent une érosion progressive de la densité des plantations et donc une baisse de production. Elles surviennent le plus souvent après la mise en saignée des arbres (mise en exploitation) ;
- Les casses massives qui sont liées à des événements de vent exceptionnels et qui entraînent une désorganisation brusque des blocs dans une partie de la plantation.

On s'intéresse particulièrement à la première modalité de casse (les casses régulières) qui sont les plus fréquents et contre lesquelles on peut envisager des moyens de protection.

1.2.3.2 Effet de la casse sur les peuplements d'hévéa

Malgré l'importance bien connue des dégâts dus au vent dans les plantations, on dispose de très peu de données sur les pertes qu'ils génèrent. Néanmoins, d'après des enquêtes de Clément-Demange et al (1995) sur une période de 30 ans un peuplement d'hévéas cultivés dans les conditions d'Afrique de l'Ouest subit des pertes régulières (liées à des vents moyens) de 3 à 5 arbres par hectare et par an. Quant aux tempêtes exceptionnelles qui peuvent survenir 2 à 3 fois tous les 10 ans, elles cumulent des pertes de 20 à 30 arbres par hectare. Au total, sur cette période de 30 ans, les casses au vent régulières sont responsables en moyenne de la perte de 120 arbres par hectare dans un peuplement et les tempêtes de la perte de 60 arbres par hectare environ.

Ces différentes observations couplées aux multiples pertes liées à la casse au vent ont conduit à une classification des clones en terme de sensibilité à la casse au vent, comme le présente le tableau ci-dessous (Nicolas, 1990).

Tableau 1-I: Classification de quelques clones d'hévéa en fonction du nombre d'arbres cassés après une tempête en 1967 et 1978, d'après Nicolas (1990).

Clones	1978		Appréciation de la sensibilité	
	Nombre d'arbres cassés à l'hectare	Pourcentage d'arbre cassés	1967 à 4 ans	1978 à 15 ans
TJ 1	255	42%	très forte	très forte
RRIM 607	195	32%	faible	très forte
IR 42	140	23%	moyenne	très forte
RRIM 605	127	21%	forte	très forte
RRIM 623	127	21%	moyenne	très forte
IR 22	103	17%	faible	forte
IAN 717	91	15%	forte	forte
PB 86	60	10%	faible	moyenne
Y 127/4	60	10%	faible	moyenne
Har 1	49	8%	faible	moyenne
Y 427/3	36	6%	faible	moyenne
Y 226/29	30	5%	faible	moyenne
PR 228	18	3%	moyenne	très faible
Y 3/46	12	2%	faible	très faible
GT 1	12	2%	faible	très faible
PR 107	10	2%	faible	très faible

Le **Tableau 1-I** montre d'une part l'importance des pertes liées à la casse au vent des arbres. D'autre part, il fait ressortir une variabilité interclonale de la sensibilité à la casse qui peut évoluer avec le temps. Ceci laisse penser que certains clones sont capables de s'acclimater pour mieux résister au vent. Toutefois, les données du tableau précédent ne permettent pas de comprendre les différences interclonale de la sensibilité à la casse au vent que l'on observe.

1.3 Réponses physiologiques des arbres aux sollicitations dues au vent : la thigmomorphogenèse

L'analyse biomécanique montre combien le couplage global entre croissance primaire et la distribution de croissance secondaire le long du tronc (des racines et branche charpentières) sont des éléments centraux de la résistance à la casse au vent des arbres. Nous avons vu dans le paragraphe précédent que le vent est une source de sollicitation quotidienne pour les arbres. Cependant, lorsqu'il n'occasionne pas de dégât sur ces derniers (déracinement, rupture du tronc ou de branche), il a des effets bénéfiques sur le fonctionnement de l'arbre, en particulier sur la croissance (Telewski and Jaffe, 1986; Smith, 2003; Hale et al., 2012).

1.3.1 Perception des déformations locales : la mécano-perception, réponses en croissances primaire et secondaire

Il est bien connu que le vent affecte les mécanismes de photosynthèse (Van Gardingen et Grace, 1991; Roden et Percy, 1993). En plus de cet effet sur la photosynthèse, il provoque également des mouvements et déformation des organes qui affectent et régulent la croissance des plantes et en particulier des arbres. Cette régulation a lieu lorsque l'arbre est soumis à des coups de vents d'intensité relativement forte mais sans dommages. Les déformations de la tige (des branches charpentières et racines) sont perçues (Coutand et al., 2009; Moulia et al., 2015; Bonnesoeur et al., 2016) et cette perception conduit à une réduction de la croissance en hauteur d'une part, à une stimulation de la croissance secondaire de la tige et des racines d'autre part (Van Gardingen et Grace, 1991; Moulia et al., 2011; Hale et al., 2012; Moore et al., 2014). Cette modification de la croissance sous l'effet des charges mécaniques externes (charge due au vent) est connu sous le nom de thigmomorphogenèse (Telewski et Jaffe, 1986).

Afin de mieux comprendre les effets induits par les mouvements dus au vent sur la morphologie et les propriétés du bois, plusieurs études ont comparé des arbres haubanés (empêchés de se mouvoir) et non haubanés (libre de se mouvoir). Ces expériences où des arbres sont haubanés pendant plusieurs années, afin de restreindre leur mouvement, ont montré que le vent était responsable d'environ 40 % de la croissance primaire et secondaire (Meng, 2006; Moulia et al., 2011; Moore et al., 2014; Bonnesoeur et al., 2016). Ainsi, Moore et al (2014) ont observé sur des Pin radiata haubanés un différentiel de croissance entre partie inférieure au point d'haubanage et partie supérieure, avec une réduction significative de la croissance radiale de la partie inférieure par rapport à la partie supérieure libre de se mouvoir. Les travaux de Bonnesoeur et al (2016) sur le hêtre ont montré qu'il existe un seuil de perception des déformations à partir duquel on observe une réaction de croissance. Autrement dit, les arbres ne répondent qu'à des stimulations mécaniques suffisamment fortes, dont le temps de retour est supérieur à la semaine.

Tous ces changements de l'arbre suite aux stimuli mécaniques dus au vent ont un caractère bénéfique, car ils permettent à l'arbre de réduire sa sensibilité aux dommages dus au vent.

1.3.2 Changements de comportement de la tige induits par la croissance modifiée par des stimuli mécaniques

Les arbres perçoivent les stimuli mécaniques dus au vent et s'acclimatent en augmentant la croissance secondaire et en réduisant la croissance primaire. Des études montrent que dans le cas d'une déformation avec une orientation préférentielle, la réponse thigmomorphogénétique se traduit par une croissance plus importante dans cette direction. Ce différentiel de croissance secondaire entraîne une ovalisation de la section de la tige dans la direction préférentielle de la

déformation, c'est-à-dire dans les zones où les déformations sont les plus importantes, comme le montre la **Figure 1-13** (Telewski, 1989; Roignant et al., 2018; Niez et al., 2019).

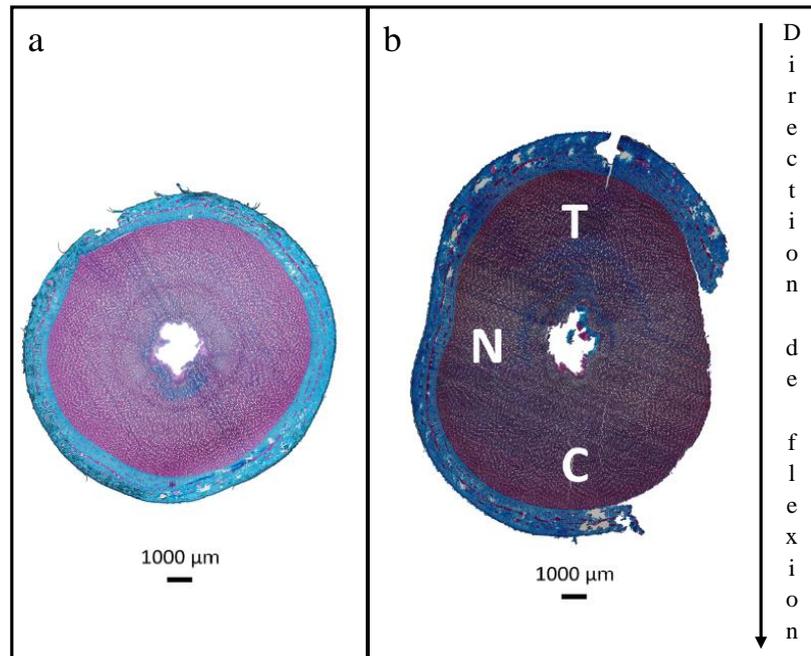


Figure 1-13: a. Coupe transversale d'une plante témoin. b. Coupe transversale de plantes soumises à des contraintes mécaniques. Trois zones sont nommées sur la coupe transversale : (C) zone soumise à la contrainte de compression, (T) zone soumise à contrainte de traction et (N) zone neutre (Niez et al., 2019).

La morphologie globale de l'arbre s'en trouve ainsi affectée par des perturbations mécaniques. Des études ont montré qu'en plus de l'ovalisation observée, les flexions de tige semblent également modifier de façon significative l'allocation de biomasse aux différents organes de l'arbre (Tamasi et al., 2005). Tamasi et al (2005) ont notamment observé chez le chêne que la stimulation mécanique entraîne une augmentation de la taille et la longueur des racines plus important dans la direction de sollicitation comparativement à la direction perpendiculaire. Des résultats similaires ont été obtenus sur des plants de maïs et de tournesol (Goodman, 1998).

La réponse thigmomorphogénétique a lieu non seulement localement dans la zone où le stimulus mécanique est appliqué mais aussi à distance. Une flexion de la tige entraîne ainsi une allocation préférentielle vers les racines plutôt que vers la partie aérienne de l'arbre (Coutand, 2000; Coutand et al., 2008; Niez et al., 2019). Toutes ces modifications de la croissance de l'arbre sont accompagnées d'un ajustement de la structure anatomique du bois.

1.3.3 Acclimatation de la structure anatomique et conséquences sur les propriétés du bois

On désigne par « bois de flexion » le bois formé dans les arbres en réponse à la flexion dynamique ou à la flexion des tissus ligneux lorsque la charge externe ne dépasse pas une certaine limite (Telewski and Jaffe, 1986; Telewski, 1989, 2016). A l'échelle anatomique, les réponses thigmomorphogénétiques se caractérisent par une différence entre le bois de flexion et le bois dit « bois normal ».

La formation de bois de flexion est souvent associée à une densité à l'échelle du cerne et une densité du bois supérieures au bois normal. De plus, lorsqu'une tige est soumise à un stress mécanique, on observe une augmentation du volume et de la masse du xylème produit par cm² de surface cambiale (Telewski and Jaffe, 1986; Telewski, 1989). Des études sur *Abies fraseri* ont notamment montré que les trachéïdes du bois produites en réponse à une flexion ont des

lumens plus petits par rapport aux trachéides du bois dit normal. Cela se manifeste par une augmentation du rapport entre la surface de la paroi cellulaire et la surface du lumen (Telewski, 1989). Le bois de flexion présente également des éléments de vaisseau plus petits en diamètre et en longueur, et des fibres plus courtes (Telewski, 1989; Badel et al., 2015). Toujours sur le plan anatomique et de la microstructure, au niveau de la paroi cellulaire, le bois formé en réponse à une sollicitation se caractérise par un AMF élevé par rapport au bois normal.

Sur la question de son rôle, des études ont montré que le bois de flexion doit fonctionner aussi bien en tension qu'en compression pour répondre au balancement alterné de la tige. Compte tenu de la faible résistance du bois en compression, des cellules avec une structure plus adaptée à la compression seront plus avantageuses pour l'arbre (Telewski, 1989; Roignant et al., 2018; Niez et al., 2020). Ainsi, les résultats de Niez et al (2020) sur des tiges de peuplier fléchies ont révélé que le bois frais formé après un traitement de compression est plus résistant aux dommages et présente une résilience mécanique plus élevée que le bois normal. Ces observations suggèrent la présence dans ce bois de tissus capables de supporter des contraintes mécaniques plus élevées que le bois normal. Cela pourrait expliquer en partie la résistance mécanique plus élevée de la tige à la flexion.

L'acclimatation des arbres aux charges mécaniques qui se traduit par une croissance secondaire accrue avec ajustement de la structure anatomique, engendre une rigidité de flexion (EI) de la tige plus importante (Telewski, 1989; Pruyn et al., 2000; Telewski, 2016; Roignant et al., 2018; Niez et al., 2020). Cette augmentation de la rigidité de flexion s'accompagne d'un module d'élasticité légèrement plus faible malgré une densité de bois de flexion plus élevée (Telewski, 1989; Niez et al., 2019). Les travaux de Pruyn et al (2000) ont fait ressortir deux stratégies de résistance de tige à la flexion induite par le vent : la première consiste à augmenter uniquement l'allocation de biomasse par la croissance secondaire pour assurer la stabilité, tandis que la seconde consiste à ajuster à la fois la quantité de matériau bois et ses propriétés.

1.4 Hypothèses sur la variabilité interclonale de la casse au vent de l'hévéa

Plusieurs hypothèses ont été avancées pour expliquer la sensibilité des clones d'hévéa au dommage dû au vent, notamment la compétition entre la production de latex et la croissance (Gohet et al., 1996; Silpi et al., 2006), l'architecture de la couronne (Combe and Du Plessix, 1974; Milet, 2001) et la présence de bois de tension (Nicolas et Hofmann, 1977; Ramos et al., 2016). Chez l'hévéa exploité, la production intense et répétée de latex induite par la saignée affecte fortement l'activité biologique de l'arbre, notamment les croissances primaire et secondaire. La saignée réduit la croissance radiale des arbres d'environ 50% après seulement la deuxième semaine de récolte du latex (Fourcaud et al., 1998; Silpi et al., 2006). La croissance en hauteur est elle aussi légèrement affectée par la saignée. Au total, les réponses de croissance se traduisent par une modification du rapport entre croissance radiale et croissance en hauteur. L'architecture de la couronne est également impliquée dans les phénomènes de brise-vent des clones d'hévéa. La forme de la couronne est très importante en brise-vent car elle contribue au moment mécanique appliqué par la traînée du vent et son poids (Petty and Swain, 1985). Ainsi, une couronne fourchue et déséquilibrée, une croissance continue de l'axe primaire et des ramifications secondaires longues, hétérogènes et persistantes caractérisent les clones sensibles (tels que PB 235 et RRIM 600 qui sont bien connus des planteurs). En revanche, les clones résistants (tels que GT1 et PB 5/51) sont caractérisés par une couronne équilibrée, une croissance limitée de l'axe primaire et de nombreuses branches courtes, homogènes et à forte mortalité (Hofmann, 1984; Compagnon, 1986a; Milet, 2001). Une étude récente sur les clones d'hévéa PR107 (sensible à la casse) et CATAS 7-20-59 (résistant à la casse) tend à confirmer ces résultats (Yun et al., 2019).

Les propriétés intrinsèques du bois formé dans les troncs d'hévéas ont également été étudiées (Nicolas et Hofmann, 1977; Ahoba, 1985; Gérard et al., 2011). La présence de bois de tension qui est anatomiquement différent du « bois opposé », semble également jouer un rôle important dans la susceptibilité des clones à la rupture. Une étude menée par Nicolas et al (1977) a porté sur la présence de bois de tension dans 10 clones et a montré que les clones les plus sensibles à la casse au vent étaient aussi ceux qui contenaient la plus grande proportion de bois de tension.

A ce jour, seul Fourcaud et al (1997) cité dans (Fourcaud, 2005), ont étudié la question du comportement mécanique des tiges d'hévéa pour comprendre la sensibilité des clones à la casse au vent. Ils ont montré à partir d'une étude expérimentale sur pied (essai de flexion statique) et numérique (modélisation numérique de flexion de tige à partir de maquettes de clone) que selon le type d'architecture, on a une répartition différente de la contrainte maximale en tension et en compression le long du tronc. Cependant, à cause du faible nombre de sujets expérimentaux de l'étude, aucune différence n'a été trouvée sur le comportement élastique des tiges entre les deux clones. Les auteurs suggèrent donc de réaliser une campagne de mesure de plus grande ampleur pour confirmer ou non ces premiers résultats.

1.4.1 Le projet vent debout

Le projet « Vent-Debout hévéa I » est piloté par le PIAF et met en relation plusieurs unités de recherche, notamment : l'UMR ISPA, l'UMR ECO&SOL et l'Institut Pascal. Il est financé par l'IFC (Institut Français du Caoutchouc) et les sociétés membres, dont la SIPH (Société Internationale de Plantation d'Hévéas), la Socfin (Société financière des Caoutchoucs) et Michelin.

Conformément aux conclusions de l'étape de priorisation et de co-construction réalisée lors du Comité Technique de l'IFC 2019, le projet « Vent-Debout hévéa I » se donne pour objectifs d'acquies des éléments de compréhension sur différentes questions d'intérêt pour les sociétés de plantation d'hévéa, à savoir : i) Comme nous l'avons vu au paragraphe §1.2.1 le profil de vent est lié aux caractéristiques du peuplement et de son couvert aussi, quels sont les caractéristiques du profil de vent dans une plantation de type hévéa ? ii) Quels est le comportement mécanique des clones d'hévéas ? Cette seconde question amène à se demander également comment la réduction de la croissance due à la saignée des arbres (*voir* §1.1.3) affecte son comportement mécanique ? iii). L'évolution de la sensibilité à la casse vue au paragraphe §1.2.3.2 permet de se dire que les clones sont capables de s'acclimater pour mieux résister. Ainsi, quel est le rôle de la thigmomorphogenèse dans la casse au vent des arbres ? Pour répondre au mieux à ces différentes questions, le projet « Vent-Debout hévéa I » s'articule autour de trois axes de recherche :

- La caractérisation et la modélisation des régimes d'exposition au vent des hévéas, ce qui permettra à terme d'avoir des modèles de profil de vent au sein d'un couvert d'hévéas ainsi que les coefficients de traînée des arbres. Une statistique des temps de retour des tempêtes sur la Côte d'Ivoire est également envisagée ;
- L'évaluation du comportement mécanique des tiges d'hévéas, ce qui permettra de définir un coefficient de sécurité au vent de ces tiges d'hévéas, intégrant l'ensemble des caractéristiques pertinentes de l'arbre ;
- L'évaluation de la capacité d'acclimatation des clones d'hévéa, ce qui permettra de déterminer le rôle de la thigmomorphogenèse dans le phénomène de casse au vent des arbres.

1.4.2 Démarche de la thèse

Ce travail de thèse s'inscrit donc dans le cadre du projet « Vent-Debout hévéa I » présenté précédemment. Toutefois, on se focalisera uniquement sur les axes 2 et 3, la caractérisation et la modélisation des régimes d'exposition au vent des hévéas ne seront pas abordées dans la suite de ce travail.

L'objectif général de ce travail est donc d'apporter des éléments de réponse aux questions ii) et iii) soulevées par le projet. Mais plus spécifiquement, il s'agit ici d'évaluer expérimentalement le comportement mécanique des tiges de deux clones d'hévéa dont l'un est très sensible et l'autre résistant à la casse au vent. Le but de cette évaluation est de mettre en évidence des paramètres biomécaniques (rigidité de flexion, résistance du bois...) qui diffèrent entre ces deux clones dont les sensibilités à la casse sont contrastées. Il s'agit également d'évaluer la capacité d'acclimatation de ces deux clones et de regarder sa variation interclonale, la finalité de ce travail étant d'apporter aux acteurs de l'hévéaculture des critères supplémentaires (biomécaniques) dans leur panel de critère de sélection clonale.

Notre démarche dans le cadre du présent travail est expérimentale. Elle s'appuie notamment sur deux grands dispositifs expérimentaux mis en place en Côte d'Ivoire dans des champs de clones de 5 et 6 ans initialement. Pour la caractérisation *in situ* du comportement mécanique des deux clones, nous avons effectué des essais de flexion sur pied. Ces essais ont été appuyés par la caractérisation (au laboratoire) du bois produit par chaque clone. Pour la caractérisation de la capacité d'acclimatation, un dispositif d'haubanage des arbres a été mis en place dans ces champs de clones.

Chapitre 2: Comportement mécanique des tiges des clones d'hévéa IRCA825 et IRCA41

2.1 Introduction

L'objectif des travaux présentés dans le présent chapitre est d'analyser le comportement mécanique des tiges de deux clones d'hévéa de sensibilité à la casse contrastée : le clone IRCA825 réputé très sensible à la casse et le clone IRCA41 réputé résistant. Il s'agit de tester quantitativement l'hypothèse sur la différence de comportement mécanique des tiges (rigidité de flexion et résistance à la rupture des tiges) pouvant expliquer la différence de sensibilité à la casse observée. Pour ce faire, nous avons effectué deux grandes campagnes d'essai de flexion sur pied dans une plantation d'hévéa située en Côte d'Ivoire (**Figure 2-1**). La première avait pour but de mettre en place toutes les expérimentations du projet « Vent debout hévéa 1 » et de caractériser le comportement des tiges avant la mise en saignée ; elle a duré un peu plus de trois mois, du 27 novembre 2020 au 3 mars 2021. La seconde a duré quant à elle un mois et demi, soit du 2 mars au 15 avril 2022 et a été effectuée sur les arbres avec un an de saignée.

Après une présentation des différentes expérimentations et méthodes, nous présenterons tout d'abord l'analyse comparative de la morphométrie des arbres, ensuite le comportement élastique des arbres des deux clones et enfin le comportement à la rupture des arbres avec une comparaison interclonale.

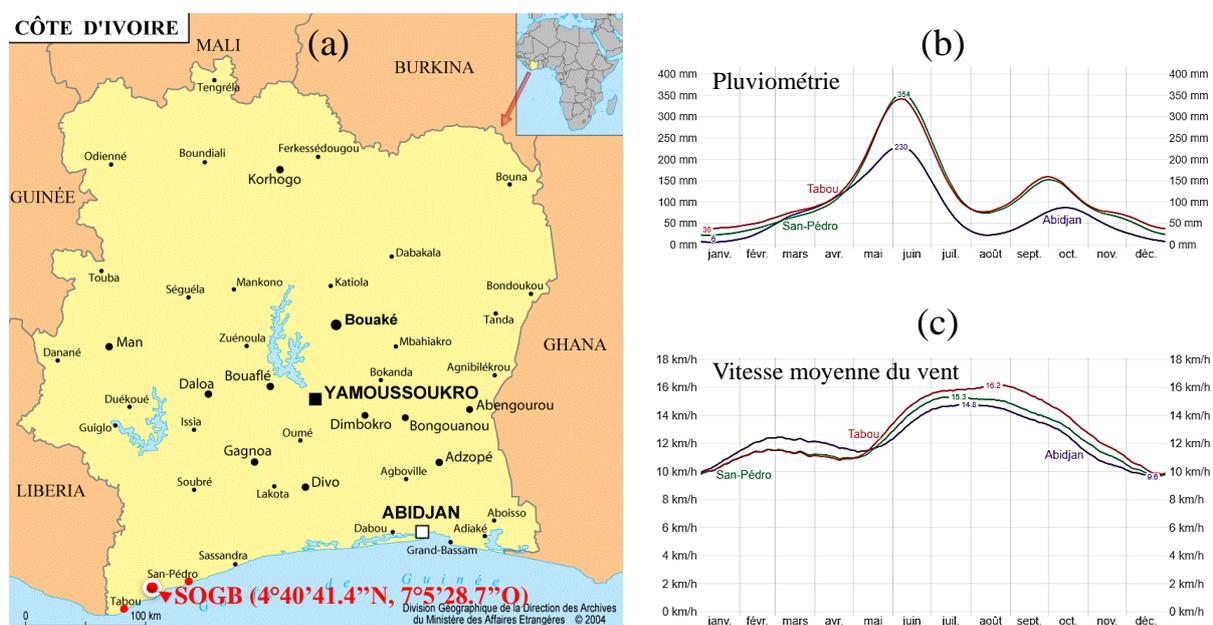


Figure 2-1: a. Carte de la Côte d'Ivoire avec la localisation du site expérimental. Pluviométrie mensuelle moyenne (b) et vitesse de vent moyenne (c) pour les villes d'Abidjan, de San-Pedro et Tabou en Côte d'Ivoire (source : <https://fr.weatherspark.com>).

2.2 Expérimentation *in-situ*

Les essais ont été menés sur des champs clonaux à grande échelle de la Société des Caoutchoucs de Grand-Béréby (SOGB) en Côte d'Ivoire.

La SOGB est une société agro-industrielle filiale du groupe SOCFINC impliquée dans la production et l'usinage de caoutchouc naturel avec 62 000 t/an environ (source : [Présentation](#)

(sogbci.com). Elle est située à environ 60 km de la ville de San Pedro à l'Ouest d'Abidjan (et Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire) dans la commune de Grand Béréby. L'ensemble du complexe (habitations et plantations comprises) s'étend sur une superficie d'environ 35 000 ha dont 16 000 ha sont plantés en hévéa. Le complexe est situé à 20 km environ au nord de la côte maritime. La SOGB est constituée de 6 cantons (Baco, Dole, Héké, Kako, Koto et Singhé) et chaque canton segmenté en 3 divisions, soit 18 divisions au total. Les divisions sont, quant à elles, subdivisées en blocs numérotés à partir de 4 ; les 3 premiers numéros étant réservés aux noms des villages des travailleurs de la SOGB (Exemple : Baco1, Baco2, Baco3...). Chaque bloc est segmenté en plusieurs panneaux ou parcelles (numéroté à partir de 1) et séparé les uns aux autres par des espacements de 12 à 13 m (ligne de panneau). Les rangées d'arbres dans chaque panneau et les arbres dans chaque rangée sont également numérotés.

Le site expérimental est situé dans la zone climatique subéquatoriale favorable à l'hévéaculture avec un peu plus de 1600 mm de précipitation annuelle (**Figure 2-1**). Il est caractérisé par un régime pluviométrique divisé en deux saisons de pluies (dont une majeure de mai à juillet et une mineure d'octobre à novembre) et deux saisons sèches (de décembre à avril et d'aout à septembre). Enfin, la topographie est caractérisée par des zones vallonnées, des sols ferrallitiques rouges et riche en gravier (Perron et al., 2021).

2.2.1 Dispositif expérimental

2.2.1.1 Sélection des blocs expérimentaux

La première étape avant le début des essais consistait à identifier les blocs dans lesquels nous allions travailler. Ceux-ci ont été choisis sur la base de certains critères : ils devaient disposer d'arbres de même âge et sur le point d'être mis en exploitation. Ce dernier critère impliquait qu'un peu plus de 50% des arbres du bloc aient une circonférence minimale de 50 cm à 1 m du sol. Pour le clone IRCA825, seul un bloc répondait à ces critères. Les circonférences de tous les arbres du dit bloc avait été mesurées 3 mois auparavant. En ce qui concerne la sélection des blocs IRCA41, nous ne disposions pas de mesure de circonférence initiale. Nous avons donc cherché un bloc aux caractéristiques similaires. Finalement, les blocs retenus pour les essais de caractérisation mécanique des arbres sont :

- **BR85²** (pour le clone IRCA825) dont la superficie totale est de 32 ha (**Figure 2-2b**), située dans la division de Baco1 aux coordonnées (4°42'48.8"N,7°10'36.6"O) et planté en 2016 ;
- **SR12** (pour le clone IRCA41) dont la superficie totale est de 44 ha (**Figure 2-2c**), situé dans la division de Singhe1 aux coordonnées (4°39'01.6"N,7°06'41.8"O) et planté en 2015.

Les essais réalisés ne couvraient pas toute la superficie des blocs sélectionnés. Dans le bloc BR85 (**Figure 2-2b**), les arbres ont été sélectionnés dans les panneaux 4, 5 et 6. Tandis que dans le bloc SR12 (**Figure 2-2c**), les essais ont été effectués dans les panneaux 43 et 45.

Ces blocs sont plantés en ligne simple de 2,5 m × 8 m, pour une densité moyenne de 500 arbres/ha. Ils sont distants d'environ 10 km à vol d'oiseau et montrent tous deux un terrain plat.

² BR pour Baco Replanté et SR pour Singhé Replanté : ce sont des parcelles qui ont été replantées après abattage de vieux arbres

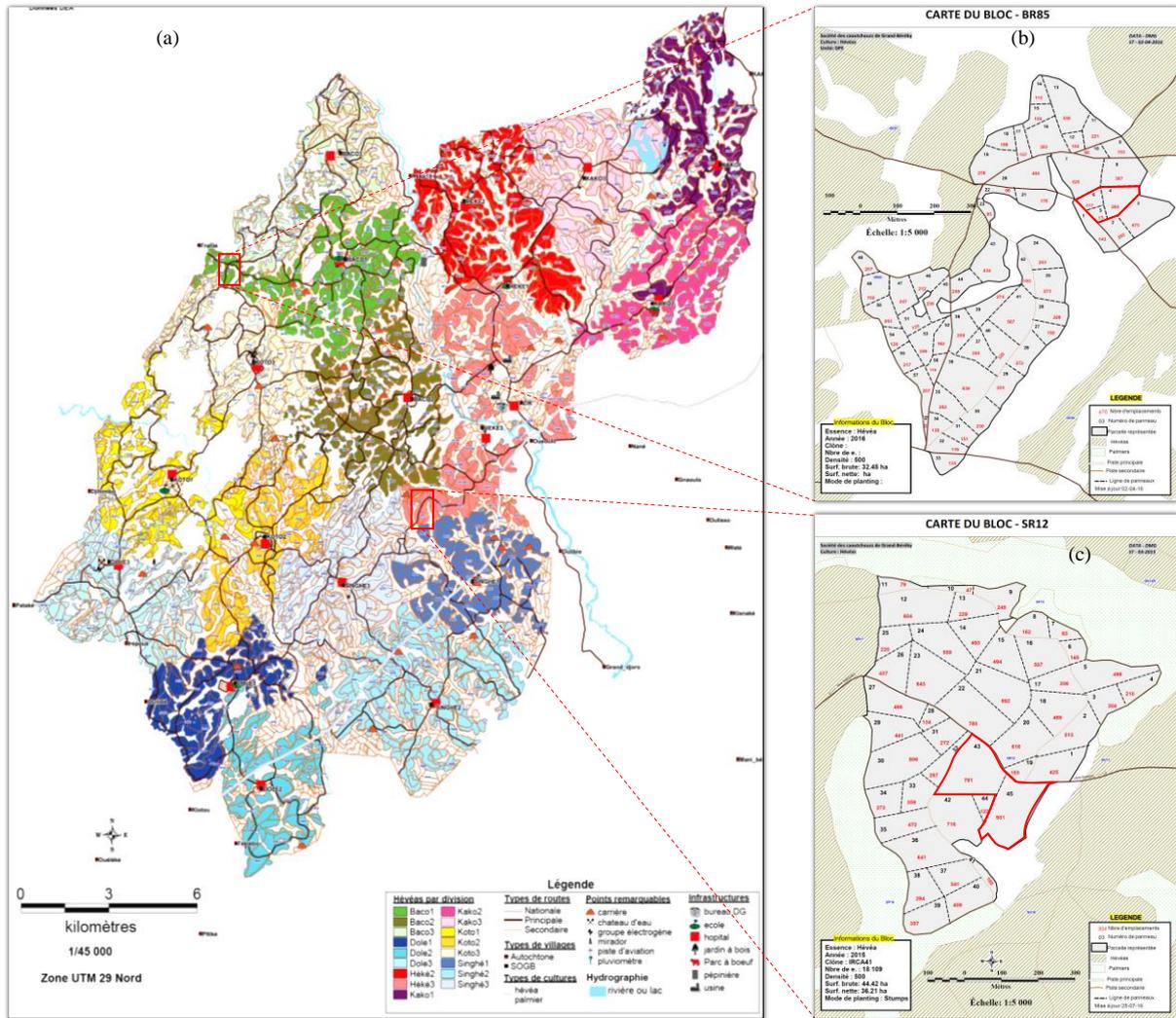


Figure 2-2: a. Carte générale des blocs d’hévéa de la SOGB, chaque couleur de cette carte représente une des 18 divisions de la SOGB. b. carte du bloc BR85 (4°42'48.8"N,7°10'36.6"O). c. carte du bloc SR12 (4°39'01.6"N,7°06'41.8"O). Les zones encadrées en rouge sur les cartes b) et c) représentent les panneaux sélectionnés pour les différentes expérimentations. Les chiffres en noir et rouge dans ces quadrilatères représentent respectivement le numéro de la parcelle et le nombre d'emplacement d’arbre (voir légende).

2.2.1.2 Sélection des arbres au sein des parcelles

Les arbres sélectionnés devaient avoir une circonférence de 50 cm à 1 m du sol, ce qui correspond à la circonférence minimale de mise en exploitation. Une variation de ± 3 cm était tout de même acceptée afin d’accéder au nombre d’arbre souhaité. Si le dispositif global initial nécessitait 24 arbres à raison de 12 arbres IRCA825 et 12 arbres IRCA41 non saignés, nous avons sélectionné 21 arbres supplémentaires, soit 10 arbres IRCA825 et 11 arbres IRCA41 pour pallier toute perte due au vent durant les années d’expérimentation. Ceci porte à 45 le nombre total d’arbres testés dans le cadre de la caractérisation mécanique des tiges, comme le présente le **Tableau 2-I**.

Tableau 2-I: Liste des arbres testés pour la caractérisation du comportement mécanique sur pied. Les arbres sont classés en ordre croissant du numéro de panneau et du numéro de l'arbre. (×) : flexion non destructive uniquement (1^{ère} campagne expérimentale 2021), (+) : test de rupture uniquement (2^e campagne expérimentale 2022).

IRCA825					IRCA41				
Année de plantation	N° du panneau	N° de l'arbre	N° de ligne	Identification de l'arbre	Année de plantation	N° du panneau	N° de l'arbre	N° de ligne	Identification de l'arbre
2016	4	3	3	A3L3×	2015	43	10	5	A10L5+
2016	4	7	4	A7L4×	2015	43	15	3	A15L3
2016	4	9	6	A9L6	2015	43	21	4	A21L4×
2016	4	11	4	A11L4	2015	43	23	11	A23L11
2016	4	15	5	A15L5	2015	43	28	5	A28L5
2016	4	15	6	A15L6	2015	43	29	5	A29L5×
2016	4	16	4	A16L4	2015	43	33	6	A33L6
2016	4	17	6	A17L6	2015	43	37	4	A37L4
2016	4	20	6	A20L6	2015	43	37	5	A37L5×
2016	4	30	5	A30L5	2015	43	42	9	A42L9
2016	5	4	4	A4L4	2015	43	43	9	A43L9×
2016	5	5	4	A5L4×	2015	43	43	10	A43L10
2016	5	6	5	A6L5×	2015	43	48	9	A48L9
2016	5	7	3	A7L3×	2015	43	48	11	A48L11
2016	5	8	4	A8L4×	2015	45	11	12	A11L12+
2016	5	9	3	A9L3	2015	45	12	17	A12L17+
2016	5	14	3	A14L3	2015	45	24	18	A24L18
2016	5	17	3	A17L3+	2015	45	26	18	A26L18
2016	6	2	6	A2L6	2015	45	29	11	A29L11
2016	6	6	7	A6L7	2015	45	29	18	A29L18
2016	6	8	7	A8L7	2015	45	30	11	A30L11
2016	6	9	7	A9L7	2015	45	51	8	A51L8×
					2015	45	54	11	A54L11

Les arbres du dispositif ont été identifiés en fonction du numéro de la ligne dans le panneau (**Figure 2-2**) et du numéro de l'arbre dans la ligne où ils se trouvaient : par exemple, A10L5 correspond à l'arbre 10 de la ligne 15 (**Tableau 2-I**). Comme les arbres ont été sélectionnés dans des panneaux différents, nous avons pris soin de varier les lignes entre les deux blocs expérimentaux (BR85 et SR12) et entre les différents panneaux (4, 5, 6, 43 et 45). Les arbres ont tous été sélectionnés au centre des parcelles afin d'éviter les effets d'exposition particulière au vent liés à la présence des pistes.

Tous les arbres présentés dans le tableau précédent ont été sélectionnés et marqués avec une peinture rouge durant la première campagne expérimentale de fin 2020 à début 2021 (**Figure 2-3**). Nous avons réalisé des tests de flexion non destructifs sur une grande partie de ces arbres. Les mêmes arbres ont par la suite servi pour les tests de rupture lors de la deuxième campagne expérimentale, exception faite sur quelques arbres (*voir Tableau 2-I*). Notons ici que les arbres dont le test de rupture a échoué (soit à cause d'un déracinement ou de données mal enregistrées) sont exclus du tableau et ne font pas partie de l'analyse, à l'exception de A9L3 et A48L9 qui font partie de l'analyse des essais de flexion non destructifs.

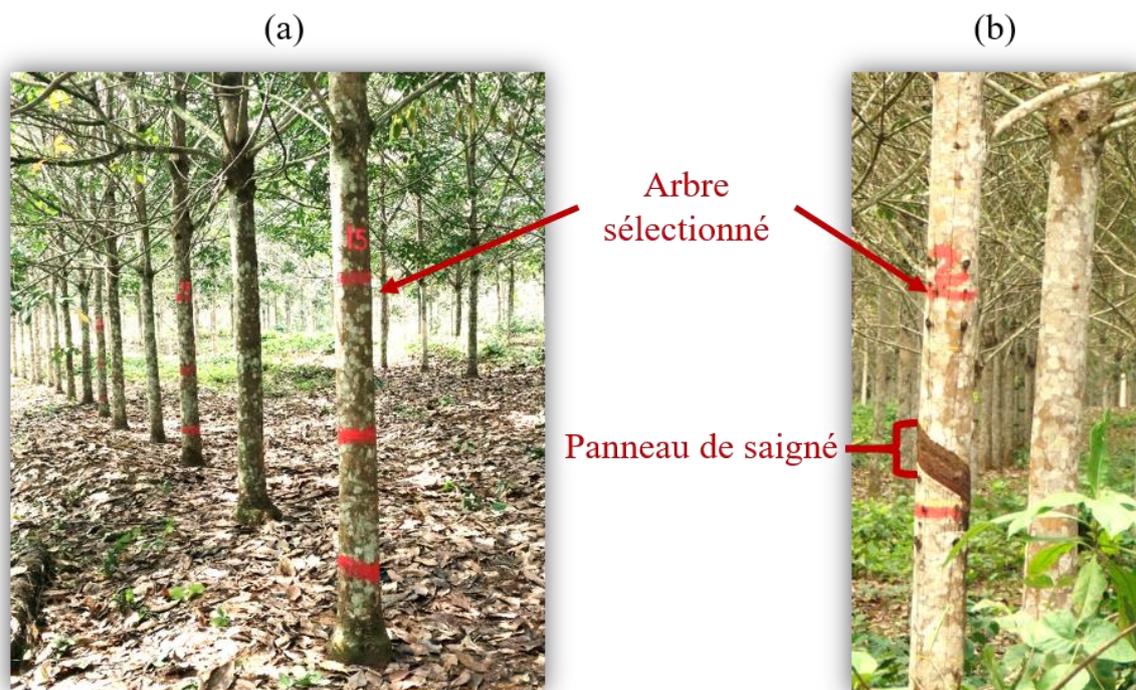


Figure 2-3: a. Arbre sélectionné pour les essais de flexion sur pied et marqué en rouge (état du tronc avant la saignée). b. Etat du tronc de l'arbre après 1 an de saignée. Les numéros marqués sur le tronc correspondent au numéro de l'arbre dans la parcelle.

2.2.1.3 Morphométrie des arbres et mesures de biomasse

L'analyse des données des essais de flexion nécessite divers paramètres. Aussi, en amont de chaque essai, certaines mesures étaient systématiquement effectuées sur l'arbre, notamment :

- La hauteur de l'arbre, mesurée à l'aide du télémètre Vertex IV (**Figure 2-4a**) dont la résolution est de 0,1m et 0,01m respectivement pour les hauteurs et les distances. Le Vertex IV est principalement conçu pour mesurer la hauteur d'objets fixes et fonctionne avec la technologie de mesures par ultrasons. Il travaille avec le transpondeur T3 que l'on fixe sur l'arbre à mesurer (à une hauteur correspondant à la hauteur des yeux) pour définir un point de référence. La hauteur est calculée selon un principe trigonométrique en utilisant les mesures d'une distance et d'un angle, en supposant que l'arbre (objet à mesurer) est perpendiculaire au plan du sol. Il faut cependant noter que malgré la très bonne résolution de l'appareil, la mesure de la hauteur des arbres reste une opération complexe à cause de la densité du couvert et de la difficulté de voir et définir la cime des arbres ;
- La hauteur de la base du houppier (correspondant à la hauteur de la première branche verte) mesurée à l'aide du télémètre ou avec un double décimètre gradué au centimètre ;
- La circonférence et les diamètres de l'arbre à 1 m, mesurés à l'aide d'un mètre ruban et d'un compas forestier respectivement (**Figure 2-4a**) ; tous deux gradués au centimètre près. Les diamètres ont été mesurés suivant deux directions perpendiculaires ; la première étant la direction de flexion ;
- L'épaisseur d'écorce (**Figure 2-4a**), mesurée à l'aide d'une jauge à écorce (graduée au millimètre) à l'emplacement des capteurs de déformation.

Des mesures plus spécifiques ont été effectuées sur certains arbres :

- La longueur de l'arbre au sol, mesurée après abattage de l'arbre ou après le test de rupture ;
- La circonférence à différentes hauteurs, mesurée tous les 1 m environ à partir de la base sur 5 arbres dont 2 IRCA825 et 3 IRCA41 ;
- L'envergure du houppier (**Figure 2-4a**) que l'on peut définir comme étant le diamètre du houppier projeté au sol. Elle a été mesurée suivant deux directions perpendiculaires (la première étant la direction de flexion), sur 34 arbres soit 16 IRCA825 et 18 IRCA41 ;
- L'excentrement ou déport du sommet du houppier par rapport à l'axe du tronc (bien que celui-ci soit généralement assez droit), qui donne des indications sur la direction des vents dominants. Cette mesure a été faite sur 16 IRCA825 et 15 IRCA41.

En plus de ces mesures de morphométrie, nous avons également effectué des mesures de biomasse sur certains arbres. Plus précisément, il s'agissait de mesures de masse du tronc et des différentes branches (avec leurs feuilles) constituant le houppier de l'arbre (**Figure 2-4b**). A cet effet, un système de deux trépieds équipés chacun d'un peson (de capacité 150 kg) a été utilisé pour la pesée des troncs. Certains troncs, trop lourds, ont dû être débités et les différentes parties pesées séparément. En ce qui concerne la pesée des branches, nous avons placé une poutre en bois sur deux branches de deux arbres voisins sur laquelle nous avons accroché un câble synthétique (de 50 cm de longueur environ) muni d'un maillon rapide qui nous a servi de poulie, afin de soulever le peson avec le lot de branches à peser. Ces mesures de biomasse ont été effectuées sur 22 arbres au total, soit 9 arbres IRCA825 et 13 arbres IRCA41.

A noter que le protocole de pesée a été modifié pour 6 de ces arbres (3 arbres IRCA825 et 3 arbres IRCA41). Avant abattage de l'arbre, nous avons coupé à la scie le maximum de branches possible tout en les numérotant (du bas vers le haut) et en notant leur hauteur sur l'arbre. Une fois cette étape terminée, l'arbre était abattu et les branches restantes étaient sciées et numérotées tout en notant toujours leur position. Les branches ainsi numérotées, ont ensuite été pesées individuellement. Enfin, nous avons pesé le tronc (en suivant le protocole décrit dans le paragraphe précédent), après avoir effectué des mesures de circonférence à différents niveaux. Le couplage des mesures de masse du tronc, masse des branches et circonférence à différentes hauteurs sur l'arbre, nous a permis de reconstituer la distribution de la biomasse aérienne de ces 6 arbres.

Les récapitulatifs des mesures et tests mécaniques réalisés sur chaque arbre entre les deux campagnes expérimentales, ainsi que l'ensemble de mesures de morphométrie et de biomasse effectuées sont présentés dans le **Tableau 2-II** (pour le IRCA825) et le **Tableau 2-III** (pour le IRCA41).

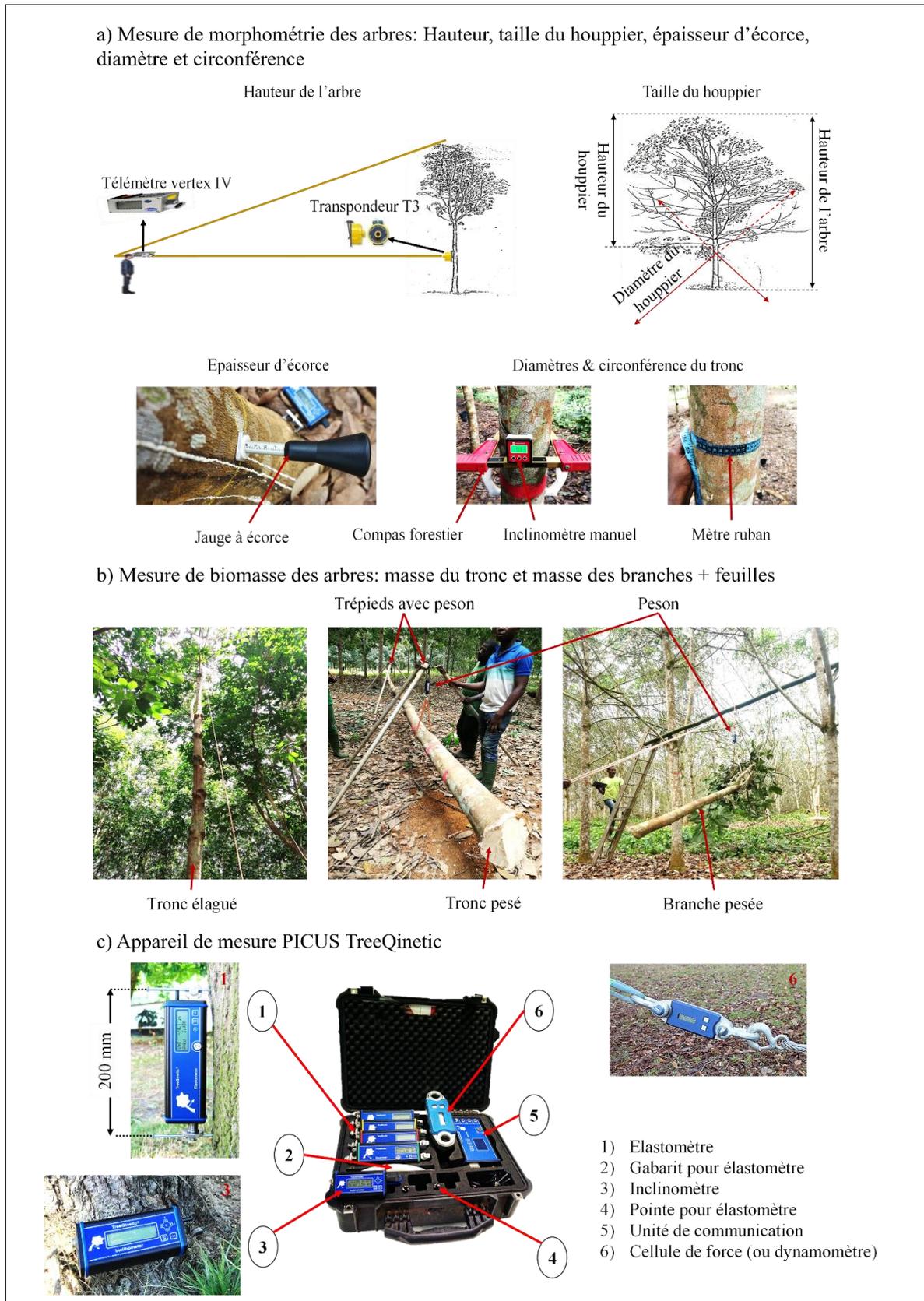


Figure 2-4: Principaux dispositifs et appareils de mesure utilisés au cours des expérimentations. **a.** Mesure de la hauteur et de la taille du houppier. **b.** Pesées des différents éléments aériens de l'arbre (tronc, branches). **c.** Dispositifs de mesures de force, déformation et inclinaison pour les essais de flexion sur pied

Tableau 2-II: Principales mesures effectuées sur chaque arbre du clones IRCA825. (×) : 1^{ère} campagne expérimentale 2021, (+) : 2^e campagne expérimentale 2022, (×+) : 1^{ère} et 2^e campagne expérimentale, (-) : mesure non réalisée.

Mesure effectuée	Flexion non destructive de la tige	Flexion jusqu'à rupture de la tige	Direction de flexion (N, S, O, E)	Hauteur de l'arbre sur pied	Hauteur de la base du houppier	Circonférence & diamètre à 1 m	Épaisseur d'écorce	Longueur de l'arbre au sol	Diamètres du houppier	Excentrement du houppier	Circonférence à différentes hauteurs	Masse de la branche et hauteur sur l'arbre	Masse des branches	Masse du tronc	Raccourcissement du câble	Inclinomètre sur le tronc à 5 m de hauteur	Échantillon de bois Prélevé
A3L3	×	-	×	×	×	×	×	-	-	-	-	-	-	-	×	-	-
A7L4	×	-	×	×	×	×	×	-	-	-	-	-	-	-	×	-	-
A5L4	×	-	×	×	×	×	×	×	-	-	-	×	×	×	×	-	×
A6L5	×	-	×	×	×	×	×	×	-	-	×	×	×	×	×	-	×
A7L3	×	-	×	×	×	×	×	-	-	-	-	-	-	-	×	-	-
A8L4	×	-	×	×	×	×	×	×	-	-	×	×	×	×	×	-	×
A17L3	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	+	+
A9L3	×	+	×+	×+	×	×+	×+	+	+	+	-	-	-	-	×	+	+
A9L6	×	+	×+	×+	×	×+	×+	+	+	+	-	-	+	+	×	+	-
A11L4	×	+	×+	×+	×	×+	×+	+	+	+	-	-	-	-	×	+	-
A15L5	×	+	×+	×+	×	×+	×+	+	+	+	-	-	-	-	×	+	-
A15L6	×	+	×+	×+	×	×+	×+	+	+	+	-	-	+	+	×	+	-
A16L4	×	+	×+	×+	×	×+	×+	+	+	+	-	-	-	-	×	+	-
A17L6	×	+	×+	×+	×	×+	×+	+	+	+	-	-	+	+	×	+	-
A20L6	×	+	×+	×+	×	×+	×+	+	+	+	-	-	+	+	×	+	-
A30L5	×	+	×+	×+	×	×+	×+	+	+	+	-	-	+	+	×	+	+
A4L4	×	+	×+	×+	×	×+	×+	+	+	+	-	-	-	-	×	+	+
A14L3	×	+	×+	×+	×	×+	×+	+	+	+	-	-	-	-	×	+	-
A2L6	×	+	×+	×+	×	×+	×+	+	+	+	-	-	-	-	×	+	-
A6L7	×	+	×+	×+	×	×+	×+	+	+	+	-	-	-	-	×	+	-
A8L7	×	+	×+	×+	×	×+	×+	+	+	+	-	-	-	-	×	+	-
A9L7	×	+	×+	×+	×	×+	×+	+	+	+	-	-	-	-	×	+	-

Tableau 2-III: Principales mesures effectuées sur chaque arbre du clones IRCA41. (×) : 1ère campagne expérimentale 2021, (+) : 2e campagne expérimentale 2022, (×+) : 1ère et 2e campagne expérimentale, (-) : mesure non réalisée.

Mesure effectuée	Flexion non destructive de la tige	Flexion jusqu'à rupture de la tige	Direction de flexion (N, S, O, E)	Hauteur de l'arbre sur pied	Hauteur de la base du houppier	Circonférence & diamètre à 1 m	Epaisseur d'écorce	Longueur de l'arbre au sol	Diamètres du houppier	Excentrement du houppier	Circonférence à différentes hauteurs	Masse de la branche et hauteur sur l'arbre	Masse des branches	Masse du tronc	Raccourcissement du câble	Inclinomètre sur le tronc à 5 m de hauteur	Echantillon de bois Prélevé
A21L4	×	-	×	×	×	×	×	-	-	-	-	-	-	-	×	-	-
A29L5	×	-	×	×	×	×	×	×	-	-	×	×	×	×	×	-	×
A43L9	×	-	×	×	×	×	×	×	-	-	×	×	×	×	×	-	×
A37L5	×	-	×	×	×	×	×	×	-	-	×	×	×	×	×	-	×
A51L8	×	-	×	×	×	×	×	-	-	-	-	-	-	-	×	-	-
A10L5	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	-
A11L12	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	+	-
A12L17	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	+	-
A15L3	×	+	×+	×+	×	×+	×+	×	-	-	-	-	-	-	×	+	-
A23L11	×	+	×+	×+	×	×+	×+	+	+	+	-	-	-	-	×	+	-
A28L5	×	+	×+	×+	×	×+	×+	+	+	-	-	-	-	-	×	+	-
A33L6	×	+	×+	×+	×	×+	×+	+	+	+	-	-	-	-	×	+	-
A37L4	×	+	×+	×+	×	×+	×+	+	+	+	-	-	-	-	×	+	-
A42L9	×	+	×+	×+	×	×+	×+	+	+	+	-	-	-	-	×	+	-
A43L10	×	+	×+	×+	×	×+	×+	+	+	+	-	-	-	-	×	+	-
A48L9	×	+	×+	×+	×	×+	×+	+	+	+	-	-	+	+	×	+	+
A48L11	×	+	×+	×+	×	×+	×+	+	+	+	-	-	-	-	×	+	-
A24L18	×	+	×+	×+	×	×+	×+	+	+	+	-	-	+	+	×	+	-
A26L18	×	+	×+	×+	×	×+	×+	+	+	+	-	-	+	+	×	+	+
A29L11	×	+	×+	×+	×	×+	×+	+	+	+	-	-	+	+	×	+	+
A29L18	×	+	×+	×+	×	×+	×+	+	+	+	-	-	+	+	×	+	-
A30L11	×	+	×+	×+	×	×+	×+	+	+	+	-	-	+	+	×	+	+
A54L11	×	+	×+	×+	×	×+	×+	+	+	+	-	-	+	+	×	+	-

2.2.2 Essai de flexion d'arbre sur pied

Du fait de la crise sanitaire et la fermeture des frontières, les essais ont été répartis sur deux campagnes expérimentales comme indiqué au paragraphe §2.1. La première campagne a permis de caractériser le comportement élastique des arbres avant la mise en saignée. La seconde campagne quant à elle, a permis non seulement la caractérisation du comportement élastique des arbres après une année de saignée mais également celle du comportement à la rupture des tiges de chaque clone.

Ces essais de flexion ont été effectués à l'aide d'un ensemble d'équipement constitué d'un tire-câble d'une capacité de 1600 kg (avec son câble en acier), d'un câble synthétique (8 mm de diamètre) d'une capacité de 6500 kg et d'une valise de mesure PICUS TreeQinetic (**Figure 2-4c**). Le système TreeQinetic est livré avec son logiciel qui assure l'enregistrement automatique des données de mesure simultanément à l'essai, avec une fréquence d'acquisition de 5 Hz (une mesure toutes les 0,2 s). Un système complet est composé des éléments suivants :

- Des élastomètres : ils mesurent l'allongement ou le raccourcissement des fibres de bois avec une résolution de 0,001 mm sur une plage de ± 2 mm ;
- Des inclinomètres : ils mesurent des variations d'angles, en particulier la rotation de la plaque racinaire, avec une résolution de $0,01^\circ$ sur une plage de $\pm 15^\circ$;
- Une cellule de force (ou dynamomètre) : d'une capacité maximale de 40 kN pour une résolution de 0,01 kN, elle mesure la force appliquée à l'arbre pendant l'essai. Elle dispose d'un inclinomètre intégré qui mesure l'angle de la force pendant l'essai, avec une résolution de $0,1^\circ$. La distance entre l'arbre à tester et le point d'ancrage qui était systématiquement mesurée en amont de chaque essai, permet également de connaître l'angle de la force ;
- Une unité de communication : elle assure la liaison entre les différents appareils de mesure (élastomètre, inclinomètre et cellule de force) avec l'ordinateur soit à travers une connexion radio ou à travers une connexion par câble.

Comme nous l'avons vu au chapitre introductif (*voir* §1.3), les arbres sont capables d'ajuster leur croissance pour mieux résister au vent. Cela passe par une augmentation du diamètre qui peut être accompagnée de l'ovalisation de la section dans le cas de vents dominants, et/ou d'une modification des propriétés du matériau. Ainsi pour tenir compte de ces ajustements de croissance dans la comparaison clonale nous avons effectué des essais dans plusieurs directions, notamment dans les directions parallèles et perpendiculaires aux vents dominants. De plus nous avons réalisé des mesures à plusieurs hauteurs, d'une part pour tenir compte d'un éventuel gradient de propriétés dû à la croissance rythmique de l'hévéa ; d'autre part pour comprendre la localisation de la rupture des arbres au-dessus du panneau de saignée (qui lui est situé entre 1,2 et 1,3 m). Tous les essais décrits ici ont été réalisés en l'absence totale de vent pour éviter des perturbations transitoires.

2.2.2.1 Protocoles d'essai de flexion sur pied : comportement élastique

Les premiers essais pour la caractérisation du comportement élastique étaient non destructifs. Ils ont été réalisés avec le souci de rester dans la zone élastique afin de ne pas endommager le bois et fragiliser l'arbre.

Pour nos essais, les mesures de déformation locale ont été faites sur trois hauteurs z différentes : $z = 1$ m, $z = 1,7$ m et $z = 2,5$ m (**Figure 2-5**). La hauteur d'application de l'effort z_F était de 5 ± 1 m durant cette campagne. Pendant l'essai, une mesure du raccourcissement du câble de traction était effectuée. A chaque mouvement aller-retour du levier du tire-câble (en partant de la position haute, voir **Figure 2-5**), une marque était effectuée sur le câble, correspondant à la

longueur de câble avalée entre ces deux mouvements. La première marque était toujours faite lorsque le câble était assez tendu et à chaque marque, la valeur de la force correspondante était notée.

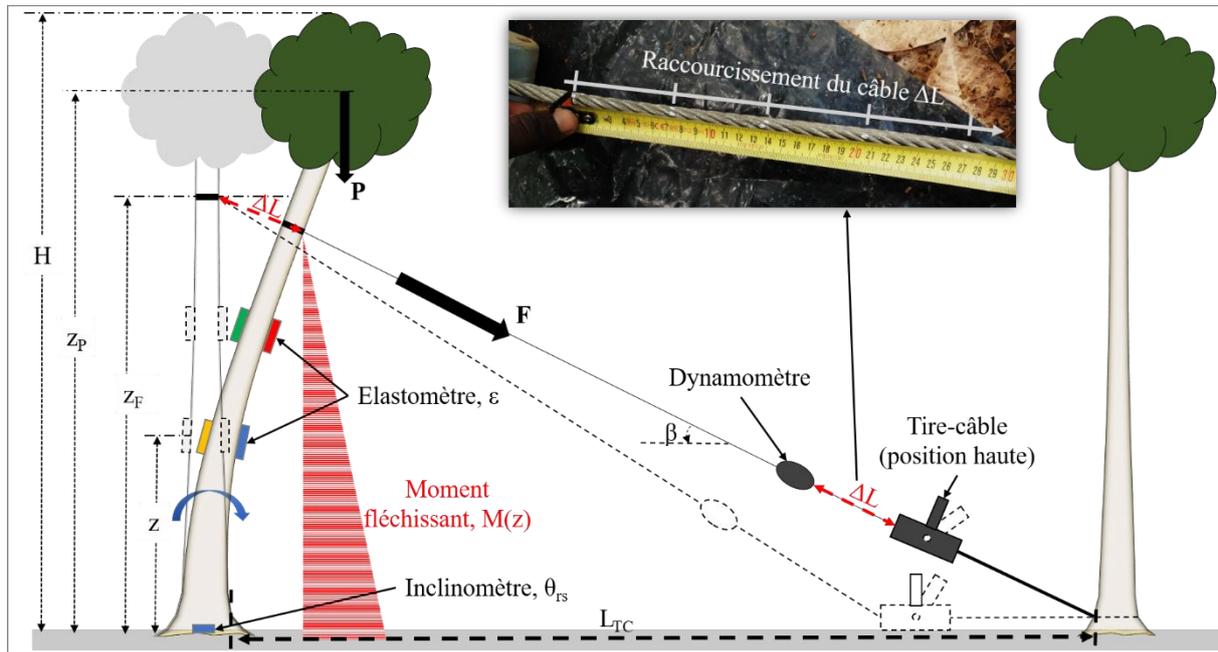


Figure 2-5: Schéma du test de flexion non destructif, avec la position des différents capteurs. H hauteur totale de l'arbre, z_F hauteur au point de fixation du câble sur l'arbre, z_P hauteur du centre de gravité de la partie au-dessus de z_F , β angle du câble avec l'horizontale, L_{TC} distance de l'arbre au point d'ancrage du tire-câble à la base de l'arbre voisin, ε déformation mesurée par l'élastomètre, θ_{rs} rotation du système racine-sol mesurée par l'inclinomètre, F force appliquée par le tire-fort, P poids du houppier, ΔL raccourcissement de la longueur du câble.

Sur chaque arbre nous avons effectué 6 tests (6 répétitions/arbre), en alternant la position des capteurs de déformation entre les trois positions de mesure et en changeant la direction de flexion. Globalement, ces 6 répétitions sont identifiées de la façon suivante (**Figure 2-6**):

- **Test 0** : tous les capteurs sont sur le tronc à $z = 1$ m, 2 dans la direction de flexion (1 sur la face en tension et l'autre sur la face en compression) et 2 dans la direction perpendiculaire ;
- **Test 1** : la position de capteur et la direction/sens de flexion restent les mêmes qu'au test 0 mais on mesure en plus le raccourcissement du câble ;
- **Test 2** : tous les capteurs sont placés à $z = 1,7$ m (en respectant la disposition décrite au 1^{er} point), la direction/sens de flexion reste la même et on mesure le raccourcissement du câble ;
- **Test 3** : 2 capteurs sont à $z = 1,70$ m (1 en compression et 1 en tension) et les 2 autres capteurs sont à la hauteur $z = 2,5$ m (1 en compression et 1 en tension). Cependant la direction/sens de flexion reste la même et on mesure le raccourcissement du câble ;
- **Test 4** : 2 capteurs sont à $z = 1,70$ m (1 en compression et 1 en tension) et les 2 autres capteurs sont à $z = 1$ m (1 en compression et 1 en tension). Ici la direction de flexion reste la même mais le sens change (opposé aux tests précédents) et on mesure le raccourcissement du câble ;
- **Test 5** : tous les capteurs sont ramenés à $z = 1$ m en respectant la disposition du test 0 mais la flexion se fait dans la direction perpendiculaire à la direction des tests précédents et on mesure le raccourcissement du câble.

Nous avons ainsi testé 41 arbres durant cette première campagne d'essais, soit 21 arbres IRCA825 et 20 arbres IRCA41 (**Tableau 2-I**).

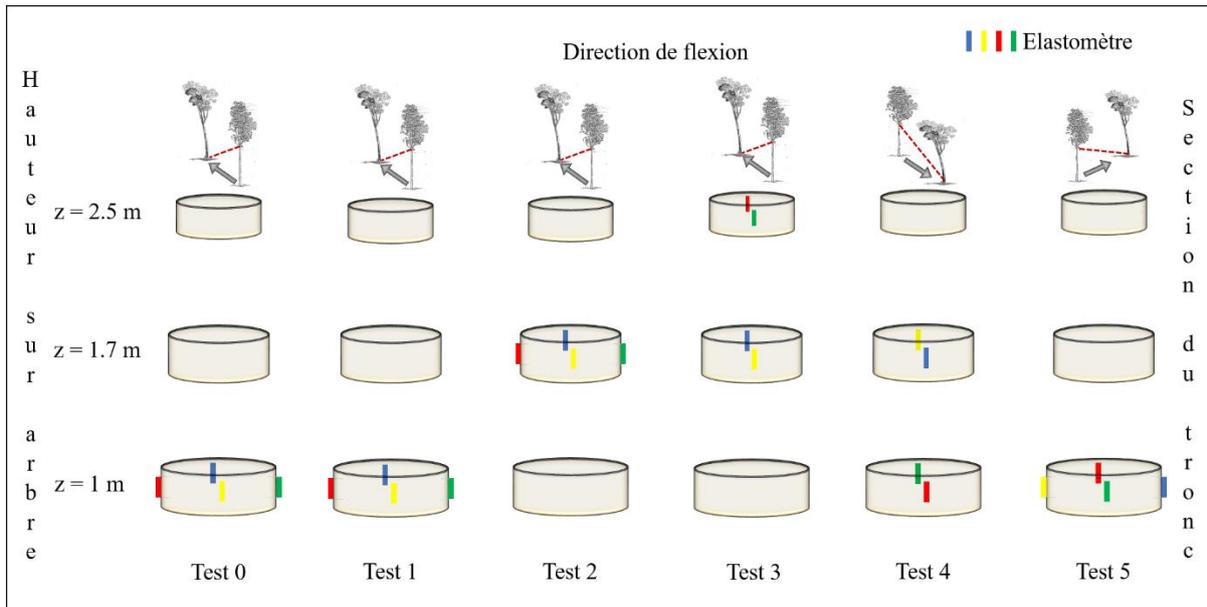


Figure 2-6: Disposition des capteurs sur le tronc. Chaque disque correspond à une section du tronc où les déformations ont été mesurées ($z = 1\text{ m}$, $z = 1,70\text{ m}$ et $z = 2,5\text{ m}$) ; les carrés bleu, jaune, rouge et vert représentent les élastomètres ; les flèches au-dessus des disques indiquent le sens et la direction de flexion.

2.2.2.2 Protocoles d'essai de flexion sur pied : comportement de rupture

Les essais de rupture ont été réalisés en 2022 sur des arbres exploités (mis en saignée) depuis un an environ. Par rapport à la première campagne expérimentale de 2021, des ajustements ont été opérés pour simplifier le protocole d'essai d'une part et pour améliorer la mesure de certains paramètres d'autre part. Tous d'abord, les essais ont été réalisés dans une seule direction : un seul test par arbre. Pour chaque arbre, le test était effectué dans une direction où l'arbre pouvait être fléchi sans contrainte de place liée à ses voisins. Pour s'en assurer et créer de l'espace, nous abattions préventivement les arbres susceptibles de perturber le test. Ensuite, les déformations locales sur le tronc ont été mesurées ici à $z = 0,3$ ou $0,5\text{ m}$, $z = 1,5\text{ m}$ et $z = 2,5\text{ m}$. Ces changements tiennent du fait que les bourrelets de cicatrisation (formés suite aux clous plantés lors de la première campagne d'essais) empêchaient de mesurer les déformations aux mêmes niveaux que les essais non destructifs. De plus, les capteurs étaient positionnés uniquement sur le côté tendu de l'arbre fléchi, pour éviter qu'ils ne soient écrasés lors de la chute de l'arbre (**Figure 2-7**).

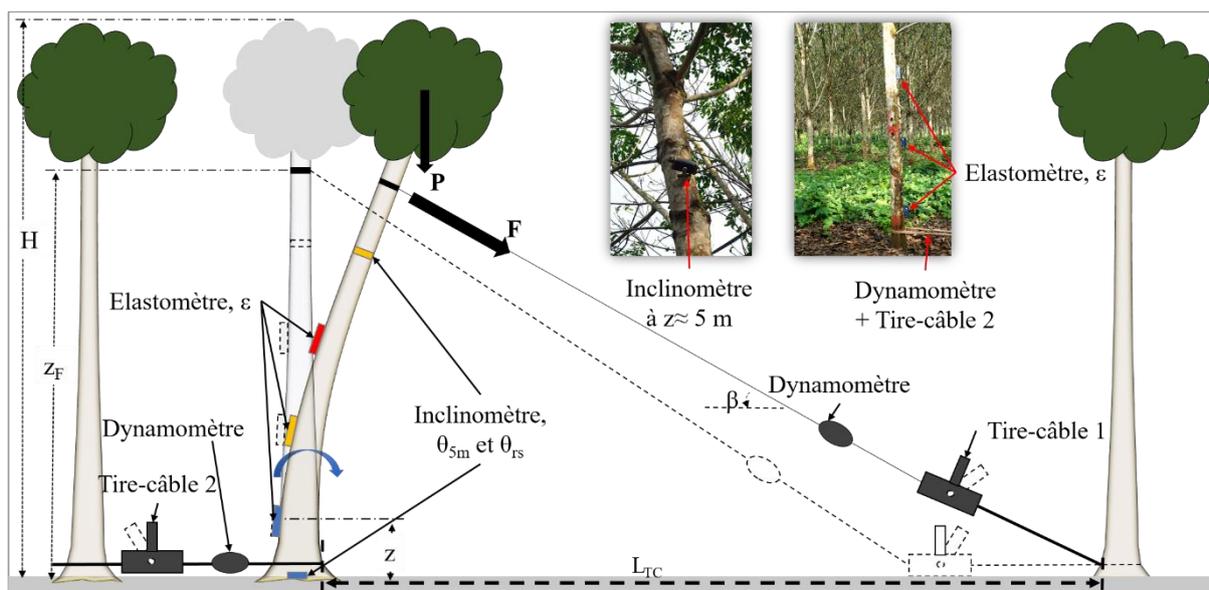


Figure 2-7: Schéma du test de rupture indiquant la disposition des capteurs. Ici, les élastomètres sont placés du côté tendu de la tige en flexion. L'inclinomètre à la base de la tige mesure la rotation (θ_{rs}) du système racine-sol et celui à 5 m environ mesure la rotation de la section (θ_{5m}). Un second tire-câble est placé à la base de l'arbre pour empêcher le déracinement.

Enfin, l'effort a été appliqué à une hauteur comprise entre 6 m et 8 m ; la distance L_{TC} (de l'arbre au point d'ancrage du tire-câble) était quant à elle comprise entre 22 et 40 m. En-dessous du point d'application de la force (à 5 m environ), nous avons placé un second inclinomètre en plus de celui situé à la base du tronc. A cette hauteur, on pouvait retirer facilement l'inclinomètre avant la rupture complète de l'arbre. Les premiers tests sur le clone sensible IRCA825, ont conduit au déracinement des arbres. Afin d'éviter ce problème, nous avons placé un second tire-câble (pré-chargé) et un dynamomètre à la base de l'arbre (voir **Figure 2-7**).

Une fois l'ensemble des capteurs positionnés sur l'arbre et les mesures de morphométrie effectuées, le test de flexion peut débuter. Au premier signe (visuel ou sonore) d'amorce de rupture, l'essai est interrompu pour retirer les capteurs de déformation et les inclinomètres installés sur le tronc. Une fois ces deux éléments retirés de l'arbre, l'essai peut reprendre jusqu'à la rupture complète de la tige ; seul le dynamomètre reste alors en position. 36 arbres au total ont ainsi été testés jusqu'à la rupture durant cette seconde campagne expérimentale, soit 17 arbres IRCA825 et 19 arbres IRCA41 (**Tableau 2-I**).

2.2.3 Méthode d'analyse des données

2.2.3.1 Moment fléchissant total appliqué à l'arbre

L'analyse des données expérimentales a été réalisé grâce à un modèle mécanique de flexion qui tente de reproduire au mieux le comportement d'une tige pendant un test en prenant en compte les spécificités morphologiques de la structure complexe qu'est un arbre. Pour cela, on modélise le tronc comme un ensemble d'éléments coniques ayant chacun leurs caractéristiques d'altitude (Z_n), masse (m_n), volume (Vol_n), inclinaison (θ_n), circonférence (c_n), etc.

L'application d'une force sur l'arbre à une hauteur z_F génère un moment fléchissant $M(z)$ sur le tronc, qui tend à le fléchir. Il en résulte un champ de déplacement qui modifie entre autres la position du houppier. Comme nous l'avons vu au paragraphe §1.2.2, cela génère un moment fléchissant supplémentaire dû au poids de la partie située au-dessus du point d'application de

la force. La section transversale située à la hauteur $z < z_F$ est ainsi soumise à une charge normale N_z et à un moment de flexion M_z donnés par :

$$N_z = -(P + F \cdot \sin\beta) \quad (2.1)$$

$$M_z = F \cdot \cos\beta \cdot [z_F - z] + F \cdot \sin\beta \cdot [v_F - v(z)] + P \cdot [v(z_G) - v(z)] \quad (2.2)$$

Avec F la force appliquée par le tirefort, P le poids du houppier, β l'angle du câble (tel que présenté sur les figures **Figure 2-5** et **Figure 2-7**) ; $v(z)$ le déplacement d'un point de la section située à la hauteur z et v_F celui de la section située à la hauteur z_F (ou la force est appliquée) ; $v(z_G)$ le déplacement du centre de gravité du houppier. Les paramètres P , $v(z)$, v_F et $v(z_G)$ des deux équations précédentes ne sont pas directement mesurés lors du test de flexion mais calculés à partir de mesures complémentaires.

Le déplacement v_F peut être obtenu de deux manières différentes à partir des données de mesure dont nous disposons. D'une part, sur la base du raccourcissement du câble $\Delta L = L_0 - L$ et de la variation de l'angle du câble $\Delta\beta = \beta_0 - \beta$ où L_0 et β_0 sont les valeurs initiales de la longueur et de l'angle du câble, respectivement. En supposant de petites valeurs de $\Delta\beta$ et $\Delta L/L_0$; en remplaçant $L_0 = z_F/\sin\beta_0$ et $\cos(\beta_0 - \Delta\beta) = \cos\beta_0 - \Delta\beta \cdot \sin\beta_0$, nous pouvons écrire :

$$L_{TC} = L_0 \cdot \cos\beta_0 = v_F + (L_0 - \Delta L) \cdot \cos(\beta_0 + \Delta\beta)$$

$$v_F \approx \Delta L \cdot \cos\beta_0 - z_F \cdot \Delta\beta \quad (2.3)$$

D'autre part, à partir de l'inclinaison Θ_{5m} de l'élément situé à 5 m environ en-dessous du point d'application de la force. Pour cela on considère la modélisation du tronc en élément comme indiqué précédemment. Lorsqu'un élément curviligne (plan) de longueur ds (**Figure 2-8**) est soumis à un moment M_z , sa section finale tourne par rapport à sa position initiale d'un angle $d\Theta$ donné par la relation :

$$d\Theta = \frac{M_z}{E \cdot I} ds \Rightarrow \theta_{n+1} - \theta_n = \frac{F_y}{E \cdot I} (z_F - Z_n) \cdot (z_{n+1} - z_n) \quad \text{avec } n \in \llbracket 1; n \rrbracket \quad (2.4)$$

où Z_n est la hauteur sur le tronc de l'élément curviligne situé entre les sections z_n et z_{n-1} , θ_n et θ_{n-1} sont respectivement les rotations de ces deux sections, F_y est la composante horizontale de la force F , E et I sont respectivement le module d'élasticité et le moment quadratique de cet élément. A partir de ce modèle de flexion simplifié (**Figure 2-8**), on peut calculer numériquement les déplacements horizontaux relatifs $v(z_n)/v_F$ et $v(z_G)/v_F$, en utilisant les données de circonférences mesurées à différents niveaux du tronc, d'après les équations suivantes :

$$v(z_n) = v(z_{n-1}) + \Delta s \cdot \sin(\Theta_n) \quad \text{avec } n \in \llbracket 1; n \rrbracket \quad (2.5)$$

$$v_F = v_{5m} + (z_F - 5) \cdot \sin(\Theta_{z_F-5}) \quad (2.6)$$

$$v(z_G) = v_F + (z_G - z_F) \cdot \tan(\theta_F) \quad (2.7)$$

Avec Δs la variation de l'abscisse curviligne le long du tronc, v_{5m} le déplacement horizontal de la section située à 5 m, Θ_n et Θ_{z_F-5} les rotations des éléments compris entre z_n et z_{n-1} et entre z_F et 5 m respectivement, z_G la hauteur du centre de gravité du houppier et θ_F la rotation de la section située en z_F (point d'application de l'effort). Le calcul des déplacements horizontaux relatifs $v(z_n)/v_F$ et $v(z_G)/v_F$, effectué dans le cas simplement d'un modèle de tronc cylindrique donne des déplacements ne dépendant que des hauteurs z , z_F et z_G (Engonga Edzang et al., 2022).

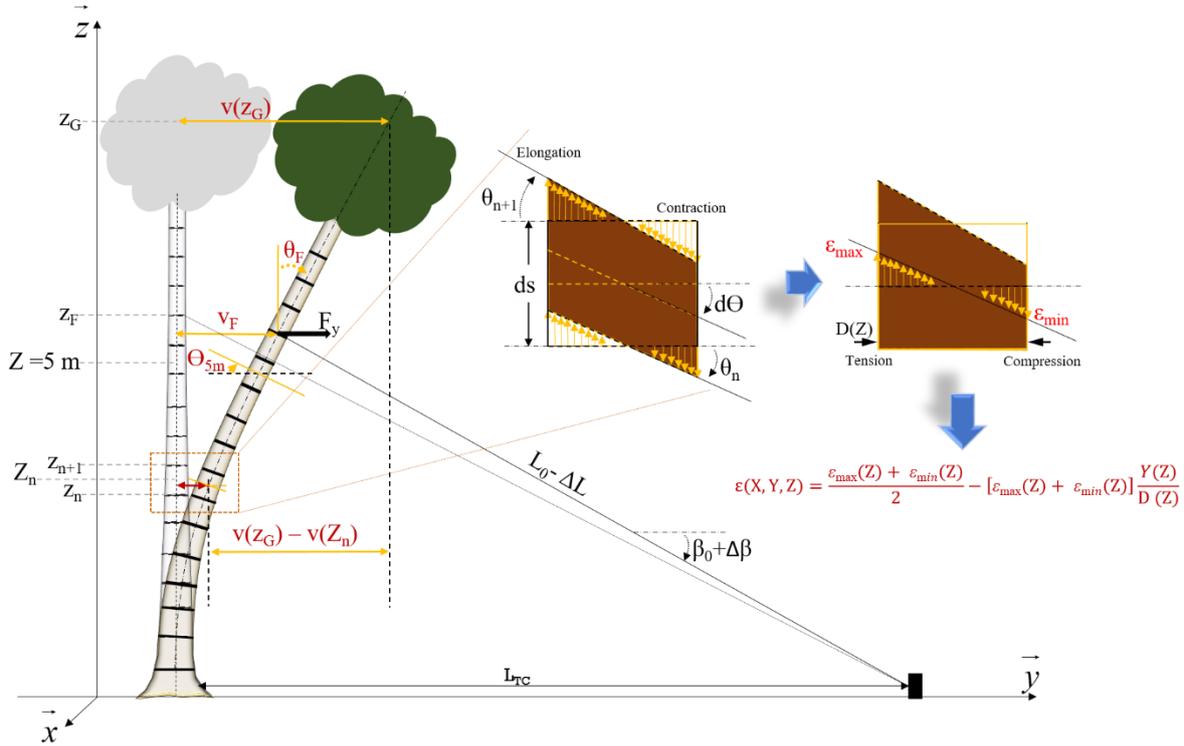


Figure 2-8: Modèle de flexion. Les paramètres Z , Z_n et Θ (en majuscule) caractérisent les valeurs au niveau des éléments ; alors que les paramètres z , z_n et θ_n (en minuscule) caractérisent les valeurs aux nœuds. Les paramètres v_F , $v(Z_n)$ et $v(Z_G)$ sont des déplacements horizontaux des différentes parties de l'arbre.

Le déplacement v_F est calculé en supposant un encastrement rigide, c'est-à-dire pas de rotation du système racine-sol. En pratique, cette hypothèse n'est pas toujours vérifiée, notamment dans le cas des essais de flexion jusqu'à la rupture. Dans ce cas, le déplacement v_F est modifié par un terme lié à la rotation de la section de base, soit : $z_F \cdot \theta_0$, avec θ_0 la rotation de cette section mesurée par l'inclinomètre placé à la base du tronc.

Les paramètres $P = m \cdot g$ (avec m la masse du houppier et g l'accélération gravitationnelle) et Z_G (équation 2.2) peuvent être déterminés à partir des mesures de la masse du tronc et sa longueur, de la masse de branche (avec les feuilles) et de circonférence à différentes hauteurs. Considérons toujours notre modèle de tronc constitué de N nœuds et de $N-1$ éléments (**Figure 2-9**). Chaque élément n est une portion de cône tronqué de masse m_n et de volume $Vol_n = \Delta z \cdot (c_n^2 + c_n \cdot c_{n-1} + c_{n-1}^2) / (12 \cdot \pi)$, avec : $\Delta z = z_n - z_{n-1}$ la longueur de l'élément, c_n et c_{n-1} les circonférences des sections z_n et z_{n-1} respectivement. Par la suite on fait l'hypothèse que les branches sont régulièrement réparties autour de l'axe du tronc (pas de branches plus lourdes d'un côté par rapport à un autre), de sorte que la masse de la branche $m_b(z_n)$ peut être ramenée sur l'axe du tronc à la hauteur z_n . Enfin, on définit la masse totale cumulée \underline{m}_n supportée par le nœud n (compris entre l'élément $n-1$ et n), comme la somme des masses $m_{n-1}/2$ et $m_n/2$ de ces deux éléments à laquelle s'ajoute la masse cumulée \underline{m}_{n+1} du nœud au-dessus et les masses $m_b(z_n)$ des différentes branches au nœud n (**Figure 2-9**). La position Z_G est déduite de la somme des masses m_n au-dessus de Z_F à travers les équations suivantes :

$$\underline{m}_n = \underline{m}_{n+1} + m_b(z_n) + \frac{m_{n-1}}{2} + \frac{m_n}{2} \quad \text{avec } n \in \llbracket 1; n \rrbracket \quad (2.8)$$

$$Z_G = \sum_{z_n > Z_F} m_n z_n / \sum m_n \quad \text{avec } n \in \llbracket 1; n \rrbracket \quad (2.9)$$

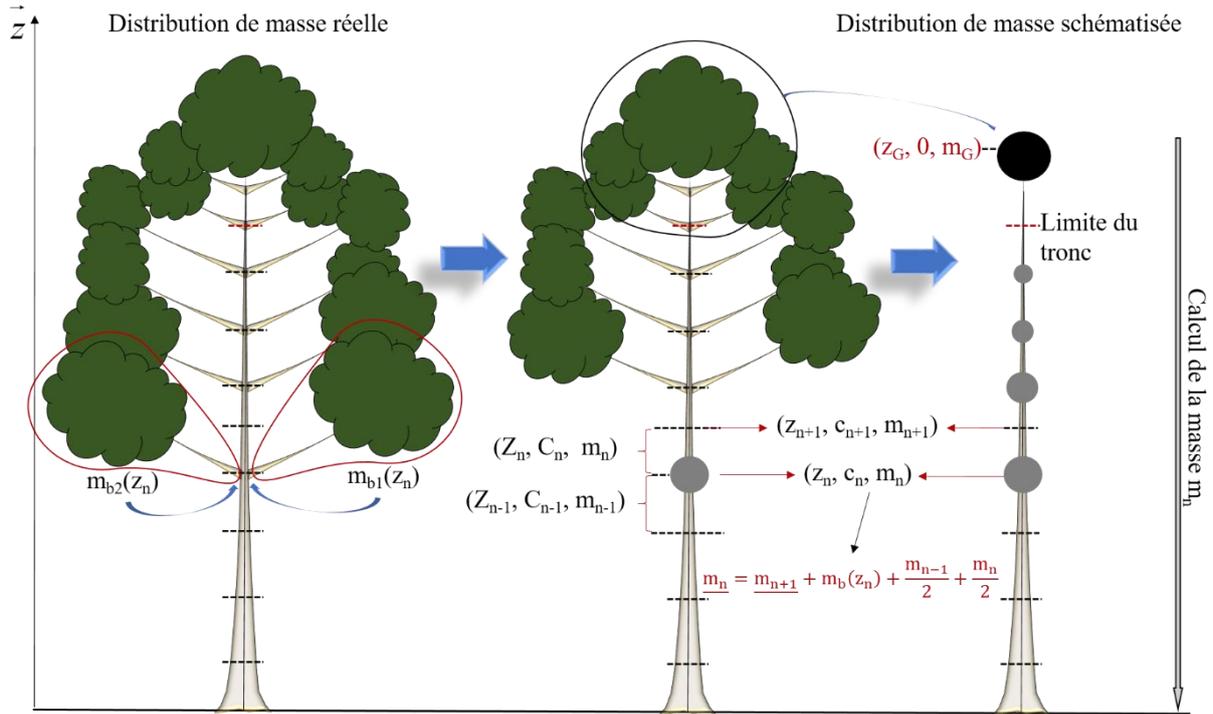


Figure 2-9: Modélisation de la distribution des masses au sein de l'arbre. Chaque élément n est caractérisé par sa hauteur Z_n , sa circonférence C_n et sa masse m_n . De même, chaque nœud n est caractérisé par sa hauteur z_n , sa circonférence c_n et sa masse m_n .

Ainsi, le moment de flexion M_z (équation 2.2) supporté par la section transversale devient :

$$M_z = F \cdot \cos\beta \cdot [z_F - z] + F \cdot v_F \cdot \sin\beta \cdot [1 - \alpha_1] + P \cdot v_F \cdot [\alpha_2 - \alpha_1] \quad (2.10)$$

où α_1 et α_2 sont les déplacements horizontaux relatifs $v(z)/v_F$ et $v(z_G)/v_F$ respectivement, calculés à partir des équations (2.3) à (2.7).

2.2.3.2 Rigidité de flexion, Contrainte longitudinale à la périphérie du tronc et module d'élasticité

Selon la théorie d'Euler-Bernoulli, pour les poutres élancées en flexion, la distribution de la déformation axiale ε dans la section transversale est une fonction linéaire de la position y par rapport au plan (x,z) :

$$\varepsilon = \delta\varepsilon - \Delta\varepsilon \cdot \left(2 \cdot \frac{y}{D_{//}} \right) \quad (2.11)$$

où $\delta\varepsilon$ et $\Delta\varepsilon$ sont respectivement les déformations moyenne et différentielle mesurées par les élastomètres (**Figure 2-5** et **Figure 2-7**) et $D_{//}$ le diamètre de la section dans la direction de flexion. Pour une section transversale constituée d'un matériau élastique homogène de module d'Young E , ces déformations sont liées à la charge par les relations suivantes :

$$\delta\varepsilon = N_z / (E \cdot S) \quad (2.12)$$

$$\Delta\varepsilon = \frac{M_z \cdot D_{//}}{E \cdot I} \quad (2.13)$$

où $S = \pi \cdot D_{//} \cdot D_1 / 4$ est la surface de la section ovale et $I = \pi \cdot D_{//}^3 \cdot D_1 / 64$ le moment quadratique de cette section, avec D_1 le diamètre dans la direction perpendiculaire à la direction de flexion. Le produit $E \cdot I$ de l'équation (1.13) caractérise la rigidité de flexion, avec E le module d'élasticité.

Les données de mesure montrent que l'ordre de grandeur du rapport $\delta\varepsilon/\Delta\varepsilon$ est de 10^{-2} donc $\delta\varepsilon \ll \Delta\varepsilon$. Ainsi, les déformations longitudinales ε varient entre $-\Delta\varepsilon/2$ sur la face en compression ($Y=+D//2$) à $+\Delta\varepsilon/2$ sur la face en tension ($Y=-D//2$). Les contraintes longitudinales à la périphérie de la section $-\sigma$ et $+\sigma$ peuvent alors être déduites par l'équation suivante :

$$\sigma = \frac{M_z \cdot D//}{2 \cdot I} \quad (2.14)$$

A partir de l'équation (2.14), on peut définir la contrainte de rupture de la tige $\sigma_r = \sigma_{\max}$ comme étant la contrainte correspondant à la force maximale lors de la rupture de la tige. Il s'agit là d'une contrainte équivalente, puisque la limite élastique est dépassée. Ainsi, à partir de cette contrainte maximale et de l'équation 1.18, on peut déterminer le facteur de sécurité CS de l'arbre.

2.2.3.3 Prétraitement effectué sur les données brutes

Comme nous l'avons indiqué au paragraphe §2.2.2, l'enregistrement des données des différents capteurs a été réalisé à une fréquence de 5 Hz. Du fait des mouvements irréguliers du tire-câble, ces données sont bruitées et irrégulières. Aussi, afin de s'affranchir de ces contraintes expérimentales, nous avons appliqué une moyenne glissante sur les données brutes sur une période de 5 secondes. La courbe de la **Figure 2-10** présente les données de mesure de force avant et après filtrage. L'ensemble des courbes de mesure (déformation, rotation et angle du câble) a ainsi été prétraité avant les différentes analyses.

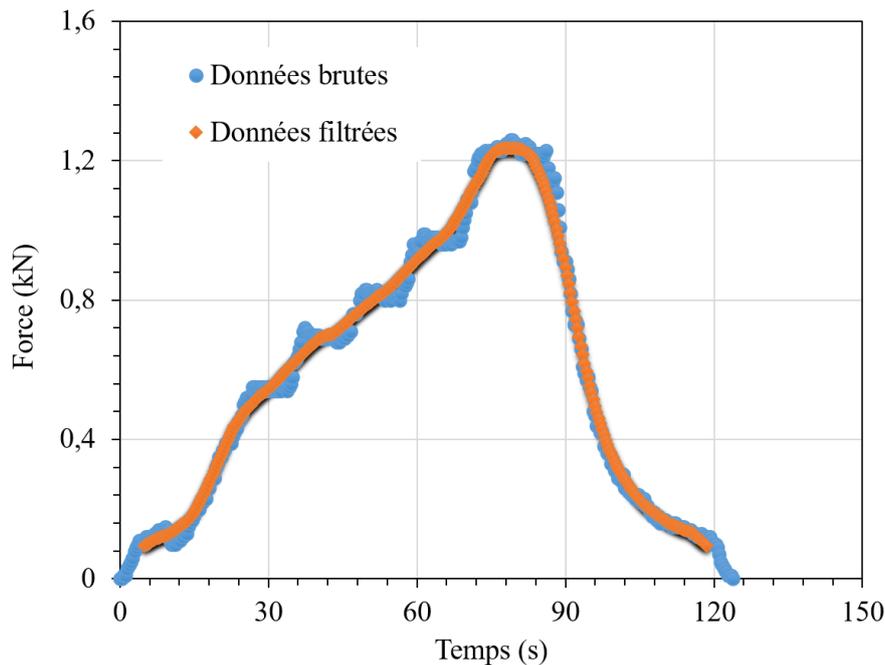


Figure 2-10: Filtrage des données brutes des essais de flexion sur pied par une moyenne glissante sur une période de 5 secondes.

L'analyse des données et les différents tests statistiques ont été réalisés avec le logiciel Xlstat 2022 (<https://www.xlstat.com/fr>) intégré à Excel 2016.

2.3 Résultats et discussions

2.3.1 Analyse comparative de la forme du tronc et du houppier chez les clones IRCA825 et IRCA41

Les études antérieures ont montré que la stabilité d'un arbre au vent peut être abordée en premier lieu (sans mesure complexe de rigidité ou de résistance) via l'acquisition de certains paramètres morphologiques et rapport de biomasse aérienne, notamment : la taille du houppier, le rapport entre la masse du houppier et celle du tronc et le facteur d'élancement défini comme le rapport entre la hauteur de l'arbre et sa circonférence³ : ici à 1 m. Ces différents paramètres renseignent sur la charge que subit un arbre par sa prise au vent et comment cette charge est transmise au tronc par effet bras de levier. Aussi nous ferons d'abord une analyse comparative de la morphologie des arbres des clones IRCA825 et IRCA41, respectivement sensible et résistant à la casse.

2.3.1.1 Caractéristiques de la morphologie des arbres de deux clones et biomasse aérienne

Les arbres des deux clones ont été choisis avec des circonférences initiales (à 1 m du sol) similaires, qui en moyenne étaient de $51,5 \pm 1,1$ cm et $51,2 \pm 1,1$ cm respectivement pour les clones IRCA825 et IRCA41. La hauteur moyenne de ces arbres était également assez proche entre les deux clones, soit $16,3 \pm 0,6$ m pour le premier et $15,1 \pm 0,5$ m pour le second. Lors de la seconde campagne expérimentale, où les arbres étaient en saignée depuis environ un an, la circonférence moyenne des arbres étaient de $56,9 \pm 1,5$ cm et $56,1 \pm 1,7$ cm pour les clones IRCA825 et IRCA41 respectivement ; soit une croissance en circonférence de +10% pour les deux clones entre la première et la seconde campagne expérimentale. La hauteur moyenne des arbres était quant à elle de $17,6 \pm 1,0$ m chez le clone IRCA825, soit une croissance en hauteur d'environ +9%. Chez le clone IRCA41, les arbres étaient haut en moyenne de $16,5 \pm 0,7$ m, soit une croissance en hauteur également d'environ +9%. L'ensemble de ces valeurs moyennes de morphométrie est résumé dans les tableaux **Tableau 2-IV** et **Tableau 2-V**, ainsi que les tests de comparaison effectués.

Tableau 2-IV: Valeurs moyennes des principaux paramètres morphologiques des arbres des clones IRCA815 et IRCA41 (campagnes expérimentales de 2021). Le diamètre du houppier n'a pas été mesuré ici. Les valeurs du tableau sont données avec \pm un écart-type. Un test de Student compare les deux clones et p correspond à la p-value de ce test. S : différence significative, NS : différence non-significative.

Clone	Hauteur des arbres (m)	Hauteur 1 ^{ère} branche (m)	Hauteur du houppier (m)	Circonférence à 1 m (cm)
IRCA825	$16,3 \pm 0,7$	$3,0 \pm 0,5$	$13,5 \pm 0,9$	$51,5 \pm 1,1$
IRCA41	$15,1 \pm 0,6$	$4,0 \pm 1,1$	$11,1 \pm 1,1$	$51,2 \pm 1,1$
p-value et niveau de signification	$p = 5,33 \times 10^{-1}$ NS	$p < 7,04 \times 10^{-5}$ S	$p < 2,82 \times 10^{-9}$ S	$p = 3,2 \times 10^{-1}$ NS

³ Habituellement en foresterie, la circonférence de référence pour la détermination du facteur d'élancement est mesurée à 1,30 m. Mais sur les hêtres, compte tenu de la présence du panneau de saignée qui commence le plus souvent entre 1,3 et 1,2 m nous avons choisi de mesurer ici la circonférence à 1m.

Tableau 2-V: Valeurs moyennes des principaux paramètres morphologiques des arbres des clones IRCA815 et IRCA41 (campagne expérimentale de 2022). Les valeurs du tableau sont données avec \pm un écart-type. Un test de Student compare les deux clones et p correspond à la p-value de ce test. S : différence significative, NS : différence non-significative.

Clone	Hauteur des arbres (m)	Hauteur 1 ^{ère} branche (m)	Hauteur du houppier (m)	Diamètre du houppier (m)	Circonférence à 1 m (cm)
IRCA825	17,6 \pm 1,0	3,0 \pm 0,5	14,8 \pm 1,1	7,0 \pm 0,9	56,9 \pm 1,5
IRCA41	16,5 \pm 0,7	4,0 \pm 1,1	12,5 \pm 1,2	7,0 \pm 0,8	56,1 \pm 1,7
p-value et niveau de signification	p = 6,79 \times 10 ⁻¹ NS	p < 7,04 \times 10 ⁻⁵ S	p < 2,78 \times 10 ⁻⁷ S	p = 7,6 \times 10 ⁻¹ NS	p = 1,0 \times 10 ⁻¹ NS

Les tableaux **Tableau 2-IV** et **Tableau 2-V** présentent également les valeurs moyennes des caractéristiques du houppier des arbres des deux clones, notamment le diamètre et la hauteur du houppier (*voir Figure 2-4a*). Les arbres des deux clones ont des diamètres de houppier similaires (7,0 m en moyenne) mais différent au niveau de la hauteur de celui-ci. En effet, les arbres IRCA825 ont un houppier qui commence très bas, la première branche verte étant en moyenne à 3,0 \pm 0,5 m du sol ; la différence entre la hauteur des arbres et hauteur de la première branche y est donc plus élevée : 13,5 \pm 0,9 m en 2021 et 14,8 \pm 1,1 m en 2022. A l'inverse de ce dernier, les arbres IRCA41 ont un début de houppier beaucoup plus haut à 4,0 \pm 1,1 m en moyenne. La différence entre la hauteur des arbres et hauteur de la première branche est donc moins élevée : 11,1 \pm 1,1 m en 2021 et 12,5 \pm 1,2 m en 2022. Cette différence de hauteur du houppier entre les deux clones est très significative (p < 2,82 \times 10⁻⁹ en 2021 et p < 2,78 \times 10⁻⁷ en 2022). Elle traduit le fait que les arbres IRCA825 ont un houppier plus allongé et donc une plus grande prise au vent, comparativement aux arbres IRCA41 qui ont un houppier moins allongé (prise au vent plus faible).

Les travaux de Petty et Swain (1985) ont établi que le rapport entre la masse du houppier et celui du tronc est un indicateur des arbres sur pied. Ainsi, plus ce rapport est faible (autrement dit, la masse du houppier relativement plus faible que celle du tronc), plus l'arbre sera stable. L'analyse de la biomasse aérienne des arbres (paramètre qui renseigne entre autres sur la contribution du houppier dans le moment fléchissant) laisse apparaître des contrastes entre les deux clones et entre les deux campagnes expérimentales. Les tableaux **Tableau 2-VI** et **Tableau 2-VII** présentent les valeurs moyennes de biomasse aérienne de quelques arbres des deux clones, lors des deux campagnes expérimentales.

Tableau 2-VI: Valeurs moyennes de biomasse aérienne de 3 arbres du clone IRCA825 et 3 arbres des clones IRCA41 en 2021. Ici les arbres pesés avaient tous leurs feuilles. Les valeurs du tableau sont données avec \pm un écart-type. Un test de Student compare les deux clones et p correspond à la p-value de ce test. S : différence significative, NS : différence non-significative.

Clone	Masse tronc (kg)	Masse houppier (kg)	Rapport Masse houppier/Masse tronc
IRCA825	139 \pm 18	109 \pm 10	0,8 \pm 0,2
IRCA41	122 \pm 10	140 \pm 6	1,2 \pm 0,1
p-value et niveau de signification	p = 2,42 \times 10 ⁻¹ NS	p = 1,22 \times 10 ⁻² S	p = 5,31 \times 10 ⁻² NS

Tableau 2-VII: Valeurs moyennes de biomasse aérienne de 5 arbres du clone IRCA825 et 9 arbres du clones IRCA41 en 2022. Ici les arbres étaient en pleine période de défoliation. Les valeurs du tableau sont données avec \pm un écart-type. Un test de Student compare les deux clones et p correspond à la p-value de ce test. S : différence significative, NS : différence non-significative.

Clone	Masse tronc (kg)	Masse houppier (kg)	Rapport Masse houppier/Masse tronc
IRCA825	174 \pm 13	211 \pm 44	1,2 \pm 0,3
IRCA41	171 \pm 23	155 \pm 25	0,9 \pm 0,1
p-value et niveau de signification	p = 8,30 \times 10 ⁻¹ NS	p = 9,59 \times 10 ⁻³ S	p = 2,46 \times 10 ⁻² S

Ces deux tableaux montrent qu'il n'y a pas de différence significative des masses moyennes du tronc entre les arbres des deux clones. Pour les arbres de 2021, ces masses étaient de 139 \pm 18 kg chez le IRCA825 et 122 \pm 10 kg chez le IRCA41 ; tandis qu'en 2022, elles étaient respectivement de 174 \pm 13 kg et 171 \pm 23 kg. Ces variations annuelles de masse du tronc sont assez cohérentes avec les variations observées au niveau des circonférences moyennes. Les mesures des masses du tronc, couplées à celle des circonférences à 1 m de chaque clone permettent d'avoir une idée approximative (sans mesure directe) sur les variations interclonales de la densité du bois vert. En effet, bien que les arbres des deux clones aient quasiment les mêmes circonférences, leurs volumes de tronc diffèrent cependant à cause de la longueur de ces derniers (en moyenne 10 et 7 m environs, respectivement pour le IRCA825 et IRCA41). Nous pouvons donc dire à cette échelle que le clone IRCA41 a un bois plus dense que le clone IRCA825, puisqu'ils ont les mêmes masses du tronc avec des volumes différents. Ces deux tableaux montrent également une différence nette de la masse du houppier entre les deux clones pour les 2 années (p = 1,22 \times 10⁻² en 2021 et p = 9,59 \times 10⁻³ en 2022). En 2021, les arbres IRCA41 présentaient une masse moyenne de houppier supérieure à IRCA825 (140 \pm 6 kg pour IRCA41 et 109 \pm 10 kg pour IRCA825). La raison la plus probable à cette variation est que les arbres IRCA41 qui ont été mesurés en 2021 étaient dans une phase plus feuillée que IRCA825. Cette explication est d'autant plus valable que lorsqu'on compare les masses moyennes des houppiers sans feuille (mesures effectuées en période de défoliation en 2022) on trouve une variation inverse de celle de 2021. Ainsi en 2022, les arbres IRCA825 présentaient des houppiers plus lourds (211 \pm 44 kg) que les arbres IRCA41 (155 \pm 25 kg).

Les tableaux **Tableau 2-VI** et **Tableau 2-VII** présentent enfin les valeurs moyennes du rapport entre la masse du houppier et la masse du tronc, avec une comparaison entre les deux clones. On note une différence significative (avec p = 2,46 \times 10⁻²) de ce rapport entre les deux clones, les valeurs moyennes étant de 1,2 \pm 0,3 et 0,9 \pm 0,1 respectivement pour les arbres IRCA825 et IRCA41. Ainsi, du point de vue du rapport entre la masse du houppier et la masse du tronc, les arbres IRCA41 sont plus stables que les arbres IRCA825.

2.3.1.2 Facteur d'élancement des arbres des deux clones

Le facteur d'élancement (défini comme le rapport entre la hauteur et le diamètre de l'arbre), couplé à d'autres paramètres telle que la densité du peuplement, permet également de caractériser la stabilité des arbres dans ledit peuplement. Les arbres dont le facteur d'élancement est inférieur à 80 (admis comme seuil maximal de stabilité) sont moins susceptibles aux dommages (Petty and Swain, 1985; Becquey and Riou-Nivert, 1987). Le **Tableau 2-VIII** présente les résultats des estimations de ce paramètre chez les arbres IRCA825 et IRCA41. Il apparaît d'après ce tableau que les arbres des deux clones sont assez stables du point de vue de leurs élancements, dont les valeurs sont respectivement de 31,8 \pm 1,3 en 2021 et 31,7 \pm 2,1 en 2022 pour IRCA825 ; et 29,5 \pm 1,4 en 2021 et 29,3 \pm 1,8 en 2022 pour IRCA41. La comparaison interclonale effectuée montre que les arbres IRCA825 sont en moyenne plus élancés que les

arbres IRCA41, la p-value du test de comparaison étant de $6,33 \times 10^{-6}$ en 2021 et $1,65 \times 10^{-3}$ en 2022.

Il est cependant important de signaler que les clones d'hévéa ont tendance à devenir très instable par rapport à leur élancement, du fait de la saignée des arbres et de la réduction de la croissance secondaire qui en résulte. Les visites effectuées dans des parcelles de plus de 15 ans ont notamment permises d'observer des arbres avec des facteurs d'élancement de plus 100 (Vincent Dellus, com. pers.) et donc largement supérieur au seuil de stabilité de 80.

Tableau 2-VIII: Valeurs moyennes du facteur d'élancement des arbres IRCA825 et IRCA41, en 2021 et en 2022. Les valeurs du tableau sont données avec \pm un écart-type. Un test de Student compare les deux clones et p correspond à la p-value de ce test. S : différence significative, NS : différence non-significative.

Clone	Facteur d'élancement en 2021	Facteur d'élancement en 2022
IRCA825	$31,8 \pm 1,3$	$31,7 \pm 2,0$
IRCA41	$29,5 \pm 1,4$	$29,3 \pm 1,8$
p-value et niveau de signification	$p = 6,33 \times 10^{-6}$ S	$p = 1,65 \times 10^{-3}$ S

L'analyse de la morphologie des arbres effectuée ci-dessus ne suffit pas à elle seule à comprendre la différence de sensibilité à la casse des clones IRCA825 et IRCA41. En effet, si elle permet de se faire une idée sur la stabilité et renseigne assez bien sur la charge du vent sur les arbres, elle ne donne aucune information sur le comportement mécanique de ces arbres et leur résistance à cette charge du vent. Aussi, pour mieux comprendre la différence de sensibilité à la casse au vent ces clones, une analyse comparative de leur comportement mécanique et leur comportement à la rupture est indispensable.

2.3.2 Relation entre les mesures mécaniques *in-situ* de 2021 et 2022

Comme nous l'avons indiqué précédemment, les essais mécaniques *in-situ* ont été réalisés au cours de deux campagnes expérimentales : la première impliquait des essais non-destructifs et la seconde des essais de flexion jusqu'à la rupture. Avant toute analyse interclonale, nous avons voulu comparer pour les mêmes arbres les mesures de propriétés mécaniques issues de ces deux campagnes d'essais. Les figures **Figure 2-11a** et **Figure 2-11b** présentent l'évolution des rigidités de flexion (EI) mesurées en 2022 en fonction de celles mesurées en 2021. On peut voir sur ces deux graphiques que plus de la moitié des points sont situés en-dessous de la diagonale passant par l'origine. Cela met en lumière que la rigidité de flexion mesurée en 2021 serait supérieure à celle mesurée en 2022 ; ceci pour les deux clones. Ce résultat est plutôt incompatible avec la croissance de l'arbre et le caractère additif de la rigidité de flexion. En effet, la rigidité de flexion d'une année $n+1$ peut être relié à la rigidité de l'année n par la relation : $EI_{n+1} = EI_n + \delta EI$; avec δEI l'incrément de rigidité de flexion dû à la croissance de l'arbre ; qui ne peut être négatif ! Or d'après les tableaux **Tableau 2-IV** et **Tableau 2-V**, la croissance moyenne des arbres chez les deux clones a été de 5 cm entre la première et la deuxième campagne, ce qui aurait dû entraîner l'augmentation de la rigidité. La même observation peut être faite au niveau des mesures de module d'élasticité. Les figures **Figure 2-11c** et **Figure 2-11d** montrent une répartition des points très en-dessous de la diagonale, signifiant que les modules d'élasticité mesurés en 2021 sont nettement supérieurs à ceux mesurés en 2022.

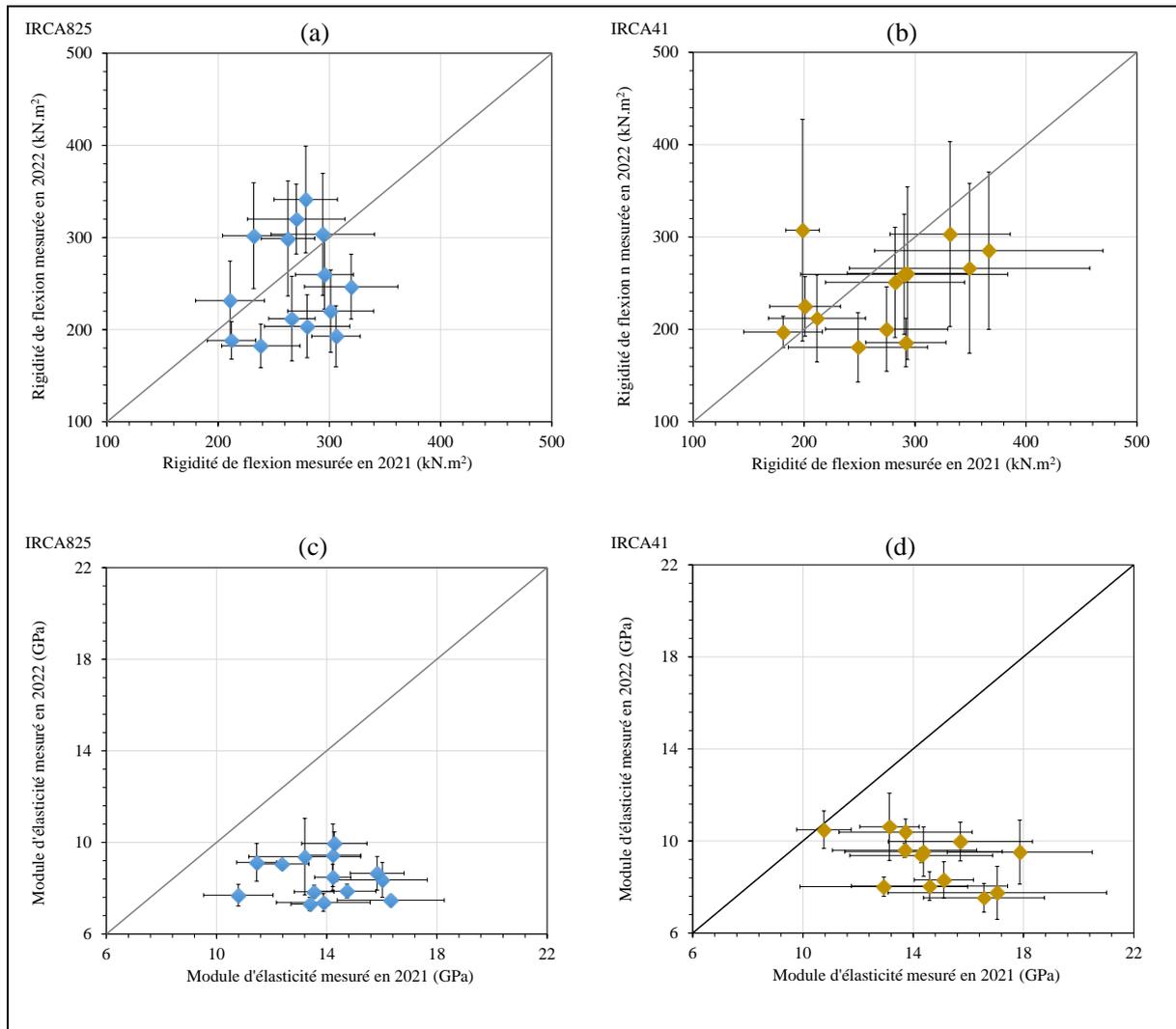


Figure 2-11: Evolution des rigidités de flexion mesurées en 2022 en fonction de celles mesurées en 2021 chez des arbres du clone IRCA825 (a) et du clone IRCA41 (b). Evolution du module d'élasticité mesuré en 2022 en fonction de celui mesuré en 2021 chez des arbres du clone IRCA825 (c) et du clone IRCA41 (d). Les barres horizontales et verticales correspondent aux écart-types.

En dehors des erreurs inhérentes à un travail expérimental *in-situ* (qui peut expliquer de faibles différences), on peut noter deux principales raisons pouvant expliquer les différences de propriétés mécaniques observées : la première raison invoquée est la question de la flexion déviée. Ce problème peut apparaître lorsque la flexion de la tige ne se fait pas exactement suivant l'axe des capteurs. La déformation mesurée par ces derniers se trouve alors minimisée par rapport à la déformation réelle et au moment fléchissant appliqué. Ce problème a pu être vérifié pour les mesures de 2021, comme le montre la **Figure 2-12** qui présente la déformation des différents capteurs autour du tronc pour un niveau de force donné. On peut voir sur cette figure que les déformations mesurées par les capteurs latéraux sont négligeables par rapport aux celles mesurées par les capteurs dans l'axe de flexion. De plus les déformations suivant l'axe de flexion (compression et tension) sont bien symétriques. Ces deux observations montrent bien qu'il n'y a pas eu de problèmes de flexion déviée pour les essais de 2021. Malheureusement, cette hypothèse n'a pas pu être vérifiée pour les essais de 2022 puisque à la différence de ceux de 2021, nous n'avons pas cette fois positionné de capteur du côté comprimé de la tige et dans la direction perpendiculaire à la direction de flexion de l'arbre. Cependant, l'hypothèse d'une mauvaise position des capteurs ne semble pas pertinente dans le cas d'écart constatés de façon récurrente.

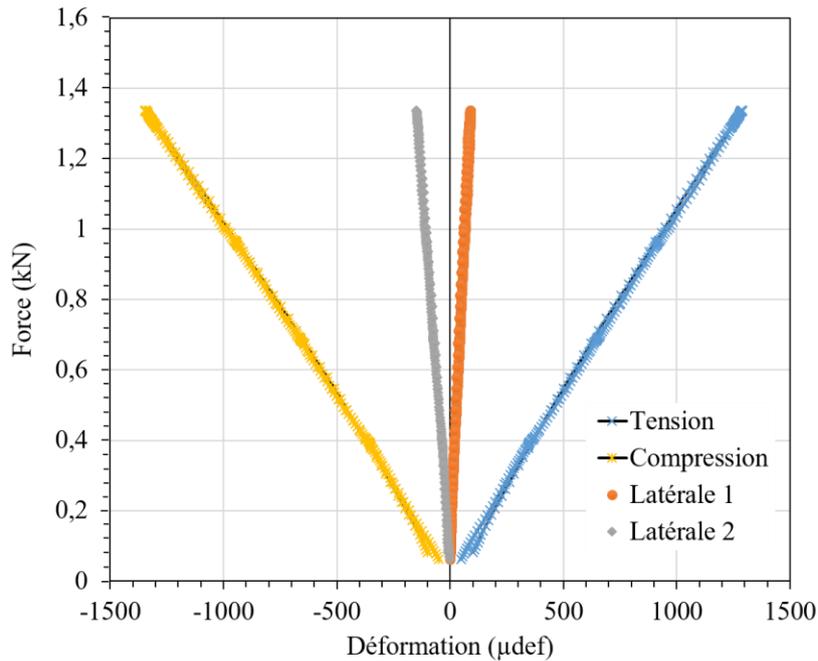


Figure 2-12: Courbe force-déformation pour un essai de flexion d'arbres sur pied non destructif

La seconde raison qui peut expliquer ces différences de propriétés mécaniques entre les deux campagnes d'essai est liée directement au système de mesure. En effet, après la première campagne expérimentale, les appareils de mesure PICUS TreeQinetic utilisés ont été renvoyés chez le fabricant pour des questions de maintenance et de recalibration. Autrement dit, les mesures n'ont pas vraiment été réalisées avec des systèmes de mesure totalement identiques, ce qui peut expliquer la différence.

Mais quelle que soit l'origine de ces différences, on peut dire globalement que soit la rigidité de flexion et le module d'élasticité ont été surestimés en 2021 ; soit ils ont été sous-estimés en 2022. Pour s'affranchir de ce soucis technique inter-années, dans les sections qui suivent, seule la comparaison interclonale du comportement mécanique des arbres sera analysée.

2.3.3 Analyse comparative du comportement élastique du tronc des clones IRCA825 et IRCA41

La rigidité de flexion EI est un paramètre biomécanique qui est défini comme le produit du module d'élasticité et du moment quadratique d'une section transversale (*voir* équation 2.13). Il caractérise la flexibilité d'une tige soumise à un moment fléchissant (Niklas, 1992). Dans la caractérisation du comportement mécanique des tiges, nous avons effectué une analyse comparative de ce paramètre entre les clones IRCA825 et IRCA41.

2.3.3.1 Rigidité de flexion EI des arbres des deux clones

Les mesures de rigidité de flexion EI ont été effectuées à différentes hauteurs ($z = 1$ m, $z = 1,7$ m et $z = 2,5$ m), comme nous l'avons expliqué au paragraphe §2.2.2.1. Les graphiques en boîtes à moustache de la **Figure 2-13** présentent la distribution à différentes hauteurs de la rigidité de flexion des arbres IRCA825 et IRCA41 mesurées en 2021. Elle montre notamment que chez les arbres IRCA825, les sections transversales du tronc à $z = 1$, $1,7$ et à $2,5$ m ont des rigidités de flexion moyennes de $280 \pm 42,8$, $247 \pm 37,7$ et $225 \pm 37,3$ kN.m² respectivement. Pour les

mêmes hauteurs de sections du tronc, les rigidités de flexion moyennes des arbres IRCA41 sont quant à elles de $282 \pm 61,6$, $238 \pm 44,4$ et $200 \pm 39,1$ kN.m². Ces résultats montrent ainsi une diminution progressive de la rigidité de flexion avec l'augmentation de la hauteur le long du tronc, pour les arbres des deux clones. Cette évolution de la rigidité de flexion avec la hauteur de mesure s'explique majoritairement par l'évolution du moment quadratique du tronc avec la hauteur. En effet, comme nous l'avons dit précédemment, la rigidité de flexion est le produit du module d'élasticité et du moment quadratique. Ce second paramètre diminue proportionnellement avec le cube du diamètre dans la direction de flexion ($I \propto D_{//}^3$, avec $D_{//}$ qui lui diminue avec la hauteur), ce qui explique la diminution de la rigidité.

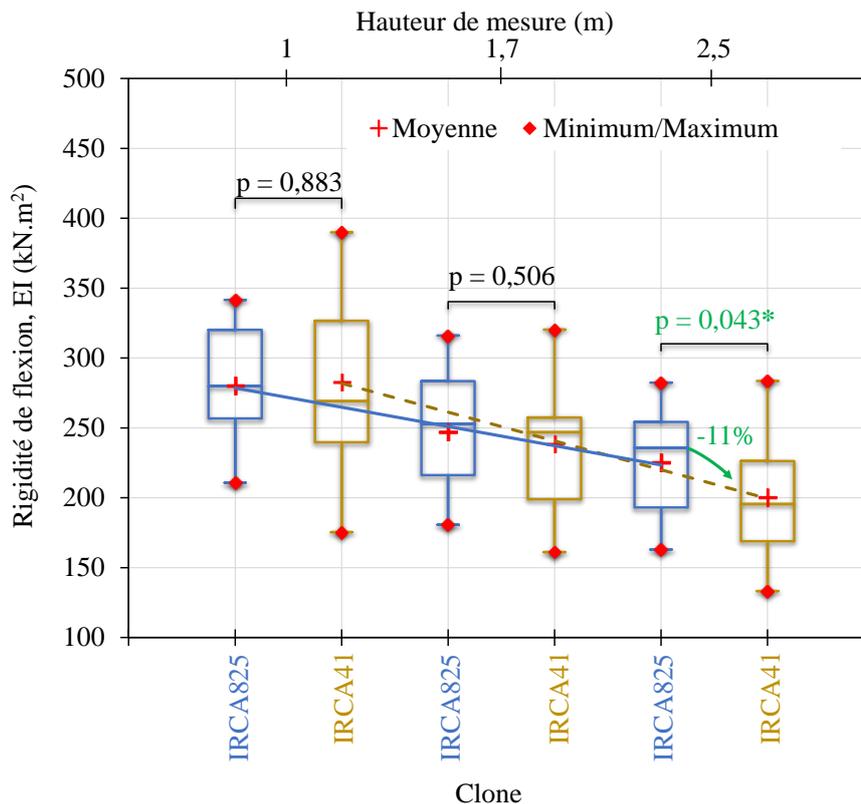


Figure 2-13: Distribution de la rigidité de flexion des arbres IRCA825 et IRCA41. Valeurs mesurées en 2021 à différentes hauteurs ($z = 1, 1,7$ et $2,5$ m). Un test de comparaison interclonale a été effectué, p correspond à la p -value de ce test. (*) indique une différence significative.

L'analyse comparative de la rigidité de flexion entre les deux clones présente des variations assez intéressantes. Les graphiques en boîtes à moustache de la **Figure 2-13** montrent que les différences de rigidité de flexion entre les arbres des deux clones mesurées à $z = 1$ et $1,7$ m ne sont pas significatives ; la p -value p du test-T de Student étant respectivement égale à $0,883$ et $0,506$. Toutefois, cette différence est significative à $2,5$ m avec $p = 0,043$. A cette hauteur la rigidité de flexion des arbres IRCA825 est supérieure à celle des arbres IRCA41. Ces résultats signifient en d'autres termes que les arbres des deux clones ont plus ou moins les mêmes rigidités de flexion à la base du tronc (à $z = 1$ et $1,7$ m) où les diamètres sont similaires, mais que cela diffère en hauteur avec la diminution du diamètre des arbres. Les mêmes observations que précédemment peuvent être faites sur les mesures de rigidité de flexion réalisées en 2022 (**Tableau 2-IX**), à savoir qu'il n'y a pas de différence significative entre les deux clones.

Tableau 2-IX: Valeurs moyennes de rigidité de flexion des arbres des clones IRCA825 et IRCA41, mesurées lors de la campagne de 2022. Un test de Student compare les deux clones et p correspond à la p-value de ce test. NS : différence non-significative.

Clone	Hauteur de mesure		
	0,5 m	1,5 m	2,5 m
IRCA825	310,9 ± 63,9	232,9 ± 46,9	211,1 ± 42,7
IRCA41	355,4 ± 95,3	221,3 ± 34,7	187,4 ± 24,5
p-value et niveau de signification	p = 0,131 NS	p = 0,431 NS	p = 0,064 NS

Ainsi, les résultats précédents révèlent que les arbres IRCA825 et IRCA41 ont des flexibilités de tronc équivalentes vers la base de la tige et des flexibilités différentes vers le haut du tronc ; avec des arbres IRCA41 plus flexibles que les arbres IRCA815 dont la rigidité de flexion est plus élevée. Ces observations amènent à se demander comment varient alors les propriétés du matériau bois entre les deux clones.

2.3.3.2 Module d'élasticité du bois vert des deux clones

On s'intéresse ici non plus à la rigidité de la tige mais plutôt à celle du bois vert formé par ces deux clones. Cette dernière est caractérisée par son module d'élasticité E (Equation 2.13). Comme nous l'avons vu dans le chapitre introductif (*voir* §1.1.2.3), le processus de formation du bois dans l'arbre peut ou non se traduire par une variation de propriété du cœur à la périphérie du tronc (Thibaut et al., 1997; Callado et al., 2001; Zue Ondo et al., 2021). Le gradient de propriété observé dans une section du tronc peut être transposé dans la direction longitudinale (de la base du tronc vers le sommet). Le diagramme en boîte à moustache de la **Figure 2-14** présente la distribution des valeurs de module d'élasticité des arbres IRCA825 et IRCA41, mesurées en 2021 à différentes hauteurs. Chez les arbres IRCA825, il montre une valeur de module plus faible à 1 m avec $13,5 \pm 1,4$ GPa, tandis qu'à 1,7 et 2,5 m les valeurs sont un peu plus élevées avec respectivement $14,0 \pm 1,5$ et $13,9 \pm 2,2$ GPa. Ces différences de valeurs de 1 à 2,5 m font penser à une augmentation du module d'élasticité du bas vers le haut de des arbre chez ce clone. Chez les arbres IRCA41, contrairement au premier clone, l'évolution du module d'élasticité avec la hauteur de mesure est moins évidente. En effet, si le module d'élasticité à $z= 1$ m est inférieur à celui mesuré à $z= 1,7$ m ($14,5 \pm 1,8$ et $15,4 \pm 2,2$ GPa respectivement) ; le module d'élasticité à $z= 1,7$ m est quant à lui supérieur à celui mesuré à $z= 2,5$ m dont la valeur moyenne est de $13,9 \pm 2,1$ GPa (**Figure 2-14**). Les faibles variations du module d'élasticité avec la hauteur (chez les deux clones) confirment une des conclusions émises au paragraphe précédent, à savoir que l'évolution de la rigidité de flexion avec la hauteur est majoritairement guidée par l'évolution du diamètre des arbres.

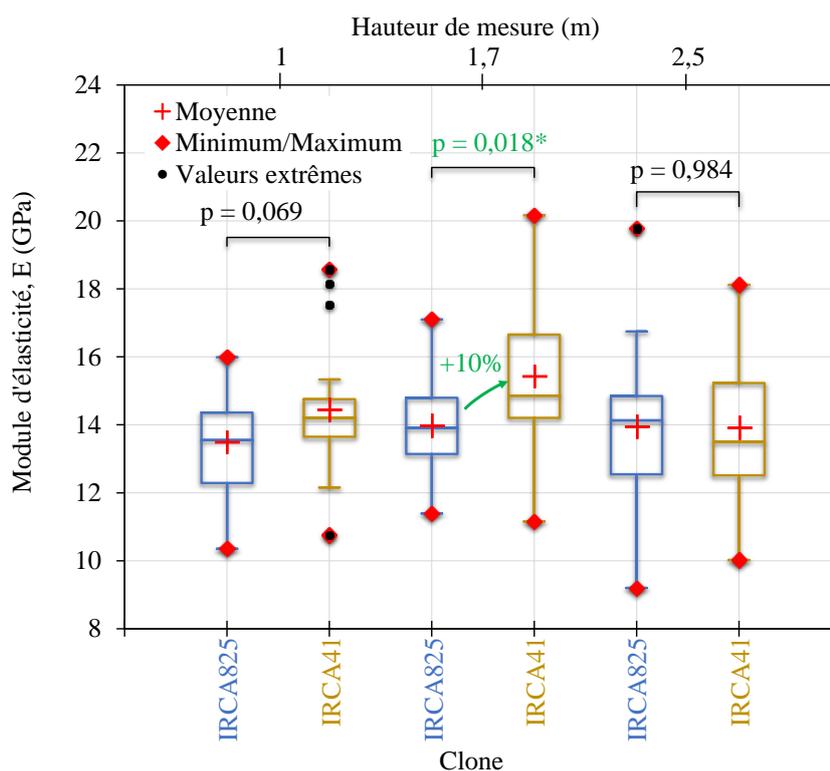


Figure 2-14: Distribution des valeurs de module d'élasticité mesurées en 2021 sur les arbres des clones IRCA815 et IRCA41, à différentes hauteurs ($z = 1, 1,7$ et $2,5$ m). Un test de comparaison interclonale a été effectué, p correspond à la p -value de ce test. (*) : indique une différence significative.

La comparaison interclonale du module d'élasticité montre d'une part que le clone IRCA41 a un module d'élasticité plus élevé (de +7 à +10%) que le clone IRCA825, notamment à $z = 1$ et $1,7$ m. D'autre part, le test de comparaison effectué montre que la différence de module d'élasticité entre les deux clones est très significative uniquement à $z = 1,7$ m, où la p -value $p = 0,046$ ($p < 0,05$). Ainsi, bien que les arbres IRCA825 et IRCA41 aient approximativement les mêmes rigidités de flexion, le IRCA41 semble produire un bois de meilleure qualité que le IRCA825.

En ce qui concerne les mesures de 2022, le **Tableau 2-X** montre que les observations précédentes sur les variations du module d'élasticité avec la hauteur de mesure restent valables chez les deux clones. De plus ce tableau montre que pour les différentes hauteurs, le module d'élasticité moyen mesuré chez le clone IRCA825 est inférieur à celui mesuré chez le clone IRCA41. Toutefois le test de comparaison bilatérale effectué indique que les différences observées ne sont pas significatives.

Tableau 2-X: Valeurs moyennes de module d'élasticité mesuré en 2022 sur des arbres des clones IRCA825 et IRCA41, à différentes hauteurs. Un test de Student compare les deux clones et p correspond à la p -value de ce test. NS : différence non-significative.

Clone	Hauteur de mesure		
	0,5 m	1,5 m	2,5 m
IRCA825	$8,1 \pm 0,9$	$8,8 \pm 1,1$	$8,7 \pm 1,4$
IRCA41	$8,8 \pm 1,1$	$9,5 \pm 1,4$	$9,3 \pm 1,5$
p-value et niveau de signification	$p = 0,079$ NS	$p = 0,122$ NS	$p = 0,265$ NS

2.3.3.3 Influence de la direction de flexion sur la rigidité du tronc et le module d'élasticité du bois vert chez les deux clones

L'étude bibliographique a montré que les réactions d'acclimatation thigmomorphogénétiques des arbres au vent peuvent s'accompagner d'une ovalisation de la section transversale du tronc dans la direction de sollicitation dominante. Il s'ensuit alors une modification du comportement mécanique de la tige en flexion dans cette direction (Telewski, 1989; Roignant et al., 2018; Niez et al., 2019). Pour vérifier cette réaction d'acclimatation chez les deux clones, nous avons comparé la rigidité de flexion et le module d'élasticité mesurés dans la direction supposée des vents dominants, à ceux mesurés dans la direction perpendiculaire.

Les courbes de la **Figure 2-15** présentent l'évolution de la rigidité de flexion à 1 m (seule hauteur où les mesures des déformations ont été faites dans les deux directions perpendiculaires), dans la direction des vents dominants en fonction de celle de la direction perpendiculaire chez les deux clones. La répartition des valeurs de part et d'autre de la diagonale quel que soit le clone ne permet pas de conclure (au premier regard) sur une dissymétrie. Néanmoins, lorsqu'on regarde la rigidité de flexion moyenne dans les deux directions on s'aperçoit que les arbres IRCA825 sont plus rigides de +4% dans la direction des vents dominant que dans la direction perpendiculaire (les valeurs moyennes étant au-dessus de la diagonale) ; tandis que pour les arbres IRCA41, il n'y a quasiment pas de différence de rigidité entre les deux directions, les valeurs moyennes dans chaque direction étant situées sur la diagonale (**Figure 2-15**). Ces observations peuvent s'expliquer par la faible différence de diamètre entre les deux directions ($D_{//} \approx D_{\perp}$). Ce qui se traduit au niveau mécanique par des rigidités de flexion assez proches dans lesdites directions.

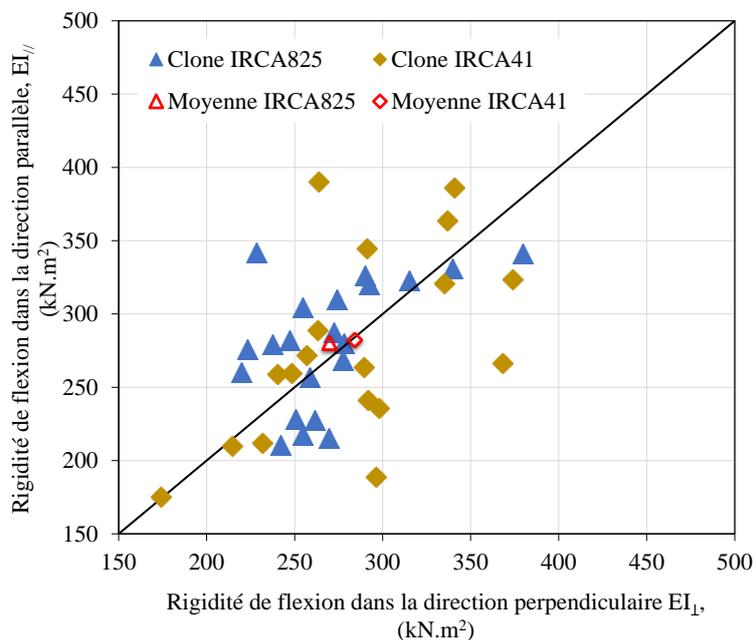


Figure 2-15: Evolution de la rigidité de flexion dans la direction parallèle en fonction de la rigidité de la direction perpendiculaire. Les points rouges correspondent aux valeurs moyennes.

Les courbes de la **Figure 2-16** présentent l'évolution du module d'élasticité du bois dans la direction parallèle au vent dominant en fonction de celui du bois dans la direction perpendiculaire. Tout comme pour la rigidité de flexion, il n'y a pas de dissymétrie notable des valeurs autour de la diagonale. On peut toutefois noter que pour les deux clones, les valeurs

moyennes de module d'élasticité dans chaque direction sont situées au-dessus de la diagonale. Cela signifie en d'autres termes que les valeurs moyennes du module d'élasticité (des clones IRCA825 et IRCA41) dans la direction des vents dominants à la flexion sont supérieurs (respectivement de +5 et +4%) aux valeurs moyennes dans la direction perpendiculaire.

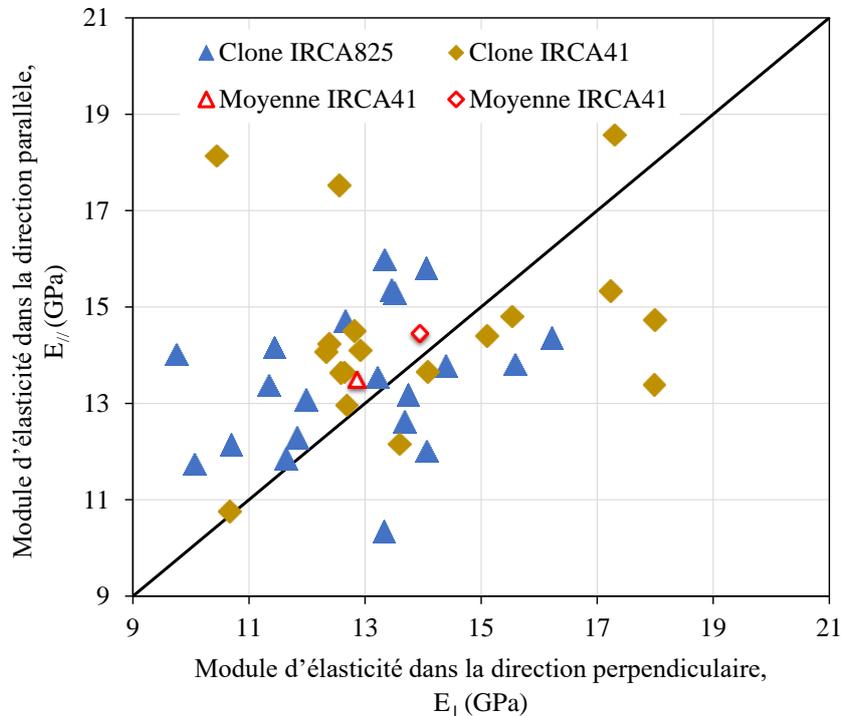


Figure 2-16: Evolution du module d'élasticité du bois formé dans la direction parallèle à la direction de vent dominant en fonction du module d'élasticité du bois formé dans la direction perpendiculaire. Les points rouges correspondent aux valeurs moyennes.

Le test de comparaison effectué (pour chaque clone) indique que les différences des valeurs de rigidité de flexion et de module d'élasticité observées entre les deux directions de mesure ne sont pas significatives. Les p-values des tests de comparaison sont de 0,243 (IRCA825) et 0,917 (IRCA41) pour la comparaison de rigidité de flexion, 0,128 (IRCA825) et 0,383 (IRCA41) pour la comparaison de modules d'élasticité ; donc inférieur au seuil de signification. L'absence de différence de rigidité de flexion ou de module d'élasticité dans les deux directions de mesure tend indiquer qu'il n'y a pas encore d'acclimatation des arbres au vent chez les clones IRCA825 et IRCA41, à cet âge (6 et 7 ans respectivement pour le premier et le second).

2.3.4 Analyse comparative du comportement à la rupture du tronc chez les clones IRCA825 et IRCA41

2.3.4.1 Moment fléchissant à la rupture des arbres des deux clones

Le moment fléchissant à la rupture caractérise l'effort maximal qu'il faut appliquer pour causer la rupture de tige. Les courbes **Figure 2-17** présentent l'évolution du moment fléchissant lors de la rupture des arbres chez les deux clones, en fonction de la hauteur de mesure. Comme on peut s'y attendre, on observe de prime abord une évolution linéaire du moment fléchissant maximal avec de la hauteur de mesure, les valeurs maximales étant vers la base du tronc. Chez les arbres IRCA825, le moment fléchissant lors de la rupture des tiges variait en moyenne entre

21,6 ±4,5 kN.m à 0,3 m et 15,6 ±3,4 kN.m à 2,5 m. En ce qui concerne les arbres IRCA41, ce moment fléchissant à la rupture variait entre 24,7 ±5,3 kN.m à 0,3 m et 16,9 ±3,6 kN.m à 2,5 m en moyenne.

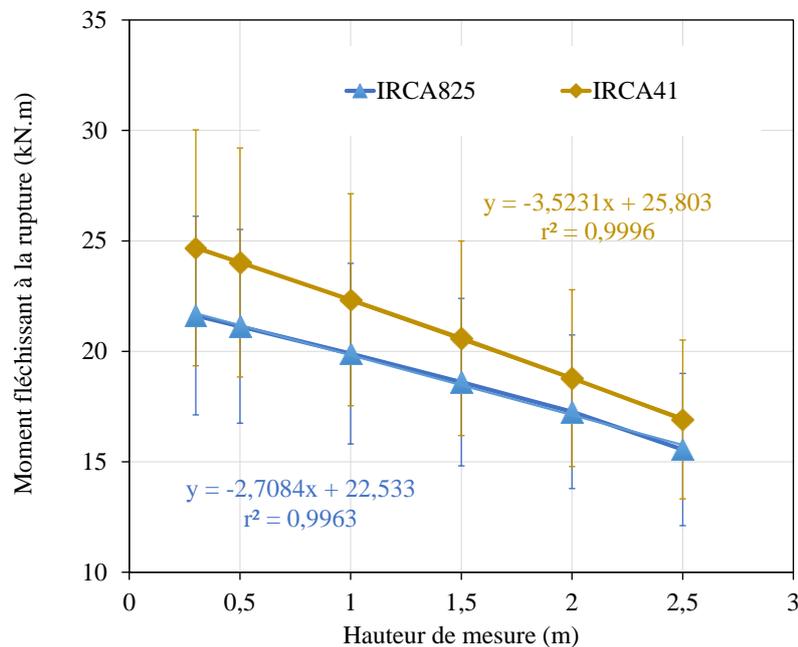


Figure 2-17: Evolution du moment fléchissant lors de la rupture des arbres IRCA825 et IRCA41, en fonction de la hauteur de mesure. Les deux courbes correspondent aux valeurs moyennes et les barres verticales correspondent aux écart-types.

Quelle que soit la hauteur de mesure, on peut observer sur la **Figure 2-17** que le moment fléchissant à la rupture des arbres du clones IRCA825 est toujours inférieur à celui des arbres du clones IRCA41. On note des différences allant de 9% à 14%, entre 2,5 et 0,5 m. Autrement dit, l'effort fourni pour casser les arbres IRCA41 est supérieur à celui fourni pour casser les arbres IRCA825. La comparaison interclonale effectuée à chaque hauteur de mesure indique cependant que ces différences ne sont pas significatives. Les p-values du test statistique de comparaison à ces différentes hauteurs de mesure (0,3, 0,5, 1, 1,5, 2 et 2,5 m) étant respectivement de 0,100, 0,110, 0,145, 0,196, 0,275 et 0,299 (supérieur au seuil de signification).

D'après les résultats de la **Figure 2-13**, les deux clones ont quasiment les mêmes rigidités de flexion. La supériorité du moment fléchissant à la rupture du clone IRCA41 comparativement au clone IRCA825, tend à montrer également une meilleure qualité du bois du premier par rapport au second.

2.3.4.2 Description de la rupture des arbres

Les différentes étapes aboutissant à la rupture complète de l'arbre étaient identiques chez les deux clones étudiés ici (IRCA825 sensible à la casse et IRCA41 résistant). L'observation des différentes images des essais permet de distinguer 3 étapes aboutissant à la chute de l'arbre (**Figure 2-18**). D'abord, nous avons un flambement au niveau de l'écorce (étape 1), sur la face comprimée de la tige en flexion. Ce flambement s'accompagne de quelque bruit de craquement de la tige (C'est au son de ces craquements que l'on retirait du tronc les élastomètres et inclinomètres). Il s'accompagne également de la rupture des vaisseaux laticifères et donc de

l'écoulement de latex. Ensuite, nous avons un éclatement du tronc (étape 2) avec plusieurs fissures se propageant le long de la tige et la rupture partielle de cette dernière. L'éclatement a lieu sur la face en tension de la tige et à une certaine hauteur située au-dessus du panneau de saignée. Enfin, la poursuite du chargement après l'étape précédente conduit à la rupture complète de la tige et à la chute de l'arbre (étape 3). Bien que la durée entre ces différentes étapes n'ait pas été mesurée (l'étape 1 n'étant pas identifiable sur une courbe de force en fonction du temps), on estime toutefois à moins de 60 s environ la durée entre les étapes 1 et 2 ; et à moins de 30 s environ la durée entre la reprise du chargement et la rupture complète de l'arbre.

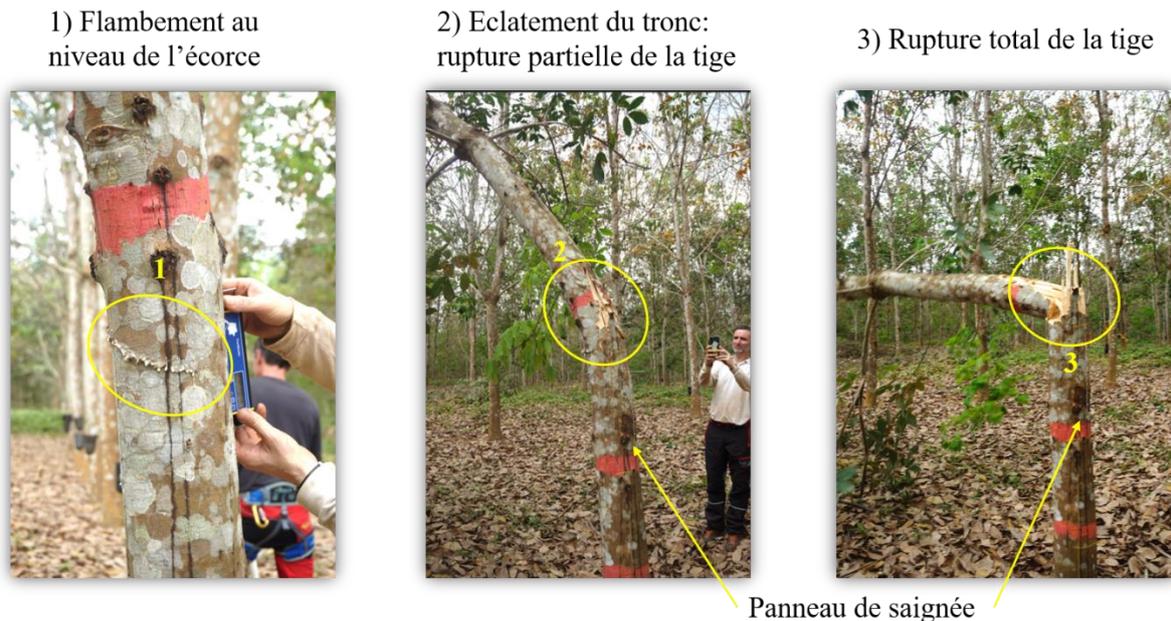


Figure 2-18: Les différentes étapes aboutissant à la rupture d'une tige d'hévéa sous charge statique.

2.3.4.3 Résistance à la rupture du bois vert dans l'arbre chez les deux clones

Les résultats précédents ont montré que la rupture d'une tige d'arbre IRCA41 nécessite un effort plus important que la rupture d'une tige d'arbre IRCA825. Ces résultats peuvent être analysés comme une combinaison entre la qualité du bois (résistance à la rupture du bois) et la distribution des diamètres le long du tronc pour chacun des clones. Afin de s'affranchir du paramètre « diamètre », nous avons déterminé la contrainte maximale (à la périphérie du tronc) lors de la rupture des arbres des deux clones à partir des valeurs du moment fléchissant à la rupture et de l'équation 2.14 (voir §2.2.3.2). Les courbes de la **Figure 2-19** présentent l'évolution de cette contrainte maximale en fonction de la hauteur chez les arbres IRCA825 et IRCA41. Cette figure montre que pour les arbres IRCA825, entre 0,3 et 2,5 m de hauteur, la contrainte maximale varie en moyenne de $42,2 \pm 5,9$ MPa (à $z = 0,3$ m) à $48,1 \pm 10,0$ MPa (à $z = 2,5$ m). Cette évolution de la contrainte avec la hauteur passe par un maximum de $53,7 \pm 7,4$ MPa, entre 1,5 m et 2,5 m de hauteur. Les mêmes observations peuvent être faites chez les arbres IRCA41, dont la contrainte maximale varie en moyenne de $46,7 \pm 8,8$ MPa (à $z = 0,3$ m) à $60,3 \pm 13,5$ MPa (à $z = 2,5$ m) ; cette évolution passe également par un maximum de $66,1 \pm 12,7$ MPa, entre 1,5 m et 2,5 m de hauteur.

Ces résultats sont à mettre en regard avec nos observations de terrain lors des tests. En effet, pour l'ensemble de nos tests de flexion, la rupture est intervenue entre 1,5 m et 2,5 m de hauteur chez les deux clones (**Figure 2-19**). On a donc une très bonne adéquation entre les estimations théoriques et les observations de terrain.

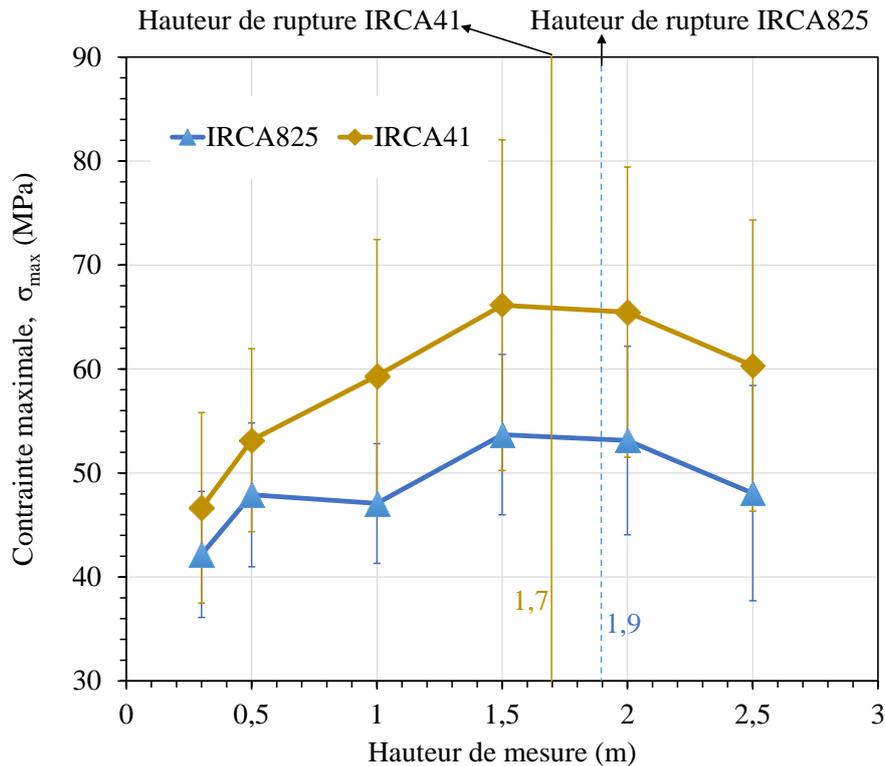


Figure 2-19: Evolution de la contrainte maximale le long des tiges IRCA825 et IRCA41 en fonction de la hauteur de mesure sur l'arbre. Les deux courbes correspondent aux valeurs moyennes et les barres verticales correspondent aux écart-types. Les deux lignes verticales (en pointillé et trait plein) correspondent aux hauteurs moyennes de rupture observées sur le terrain.

Nous avons effectué une comparaison interclonale de la contrainte maximale autour de la zone de rupture (entre 1 et 2 m de hauteur) chez les deux clones. La **Figure 2-19** montre que la contrainte maximale chez les arbres IRCA41 est nettement supérieure à celle mesurée sur les arbres IRCA825, quel que soit la hauteur de mesure. On note des différences allant de 23% (à 1,5m et 2 m de hauteur) à 26% (à 1m et 2,5 m de hauteur). Le test de comparaison effectué indique que ces différences de contrainte maximale entre les clones IRCA825 et IRCA41 sont statistiquement significatives ($p=0,003$ à $p=0,011$).

La résistance à la rupture du bois vert de chaque clone (qui correspond ici à la contrainte maximale à la hauteur de rupture, soit 1,9 m pour IRCA825 et 1,7 m pour IRCA41) a été calculée en effectuant une interpolation linéaire des valeurs entre 1,5 m et 2 m. Les résultats montrent que les résistances à la rupture du bois vert sont respectivement de 53,2 MPa et 65,7 MPa pour le clone IRCA825 et IRCA41. Ainsi, le bois produit par le clone IRCA41 (résistant) est +23% plus résistant en flexion que le bois produit par le clone IRCA825 (sensible). Ces résultats sur la différence importante de la résistance du bois vert entre nos deux clones diffèrent de ceux trouvés par Fourcaud (2005) entre les clones PB235 et GT1. En effet, ce dernier n'avait pas trouvé de différence significative de rigidité de flexion ni de résistance à la rupture entre ces clones. Comme il l'avait suggéré, ces résultats étaient aussi certainement dus à un échantillonnage faible (4 arbres/clone). Avec un échantillon 5 fois plus important dans notre dispositif nous avons trouvé des rigidités de flexion similaire entre nos deux clones avec des résistances à la rupture du bois très différentes.

2.3.5 Facteur de sécurité au vent chez les clones d'hévéas IRCA825 et IRCA41

L'absence d'information sur les vitesses de vent dans les plantations d'hévéas et donc, de la contrainte habituellement subie par les arbres, ne permet pas de calculer le coefficient de sécurité CS tel que défini au paragraphe §1.2.2. Nous avons tout même estimé un facteur de sécurité au vent pour les arbres des clones IRCA825 et IRCA41, en nous appuyant sur l'expression proposé par Noyer (2017), et définie par la relation suivante (Noyer, 2017) :

$$FS = \frac{D^3}{R_c \cdot H^2} \quad (2.15)$$

où D est le diamètre de l'arbre mesuré à 1,5 m, R_c le rayon du houppier calculé à partir du diamètre du houppier mesuré et H la hauteur de l'arbre (**Tableau 2-V**). FS est un facteur qui permet de comparer la croissance en diamètre des arbres avec leur croissance en hauteur et qui prend en considération l'étalement du houppier qui impacte la prise au vent. A partir de l'équation précédente (2.15) et des valeurs expérimentales de D, R_c et H mesurées, nous avons calculé le facteur de sécurité FS pour chaque clone. La **Figure 2-20** présente la distribution des valeurs de FS calculées. Cette figure montre que chez IRCA825, la valeur de FS est en moyenne de $4,8 \cdot 10^{-6} \pm 9,3 \cdot 10^{-7}$, tandis qu'elle est de $5,3 \cdot 10^{-6} \pm 8,8 \cdot 10^{-7}$ pour IRCA41, soit une différence de 12% entre les deux clones (avec $p = 0,074$). De nouveau, on retrouve donc une tendance en faveur d'un meilleur comportement mécanique de IRCA41 comparé à IRCA825 avec un meilleur rapport entre l'allocation en diamètre et la croissance en hauteur qui favorise la prise au vent et le moment appliqué par le houppier.

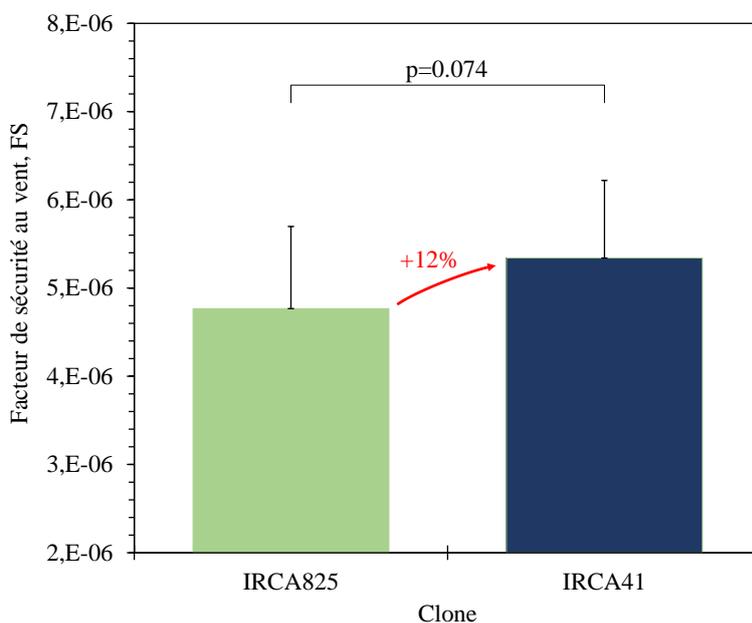


Figure 2-20: Facteur de de sécurité (FS) moyen pour chaque clone. FS est calculé à partir de l'expression proposée par Noyer (2017). Les barres verticales correspondent aux écart-types. P correspond à la p-value du test de comparaison (bilatérale) interclonale.

Il faut toutefois noter que cette différence interclonale pour le facteur de sécurité FS, comme pour les autres paramètres, n'est pas figée et peut être fortement impactée notamment avec la mise en saignée sur chaque clone. En effet, comme on l'a vu au paragraphe §1.4, la saignée réduit de façon considérable la croissance des arbres, avec un effet très important sur la croissance secondaire (Clément-Demange et al., 1995b; Silpi et al., 2006). Cet impact de la

saignée sur l'allocation de biomasse aux croissances primaire et secondaire diffère d'un clone à l'autre, ce qui pourrait alors conduire à modifier les conclusions actuelles.

2.3.6 Bilan sur les différences interclonales de comportement mécanique de la tige

L'analyse descriptive de la morphologie des arbres des deux clones et leurs biomasses montre que les arbres du clone IRCA41 réputés pour être résistants au vent sont plus stables que ceux du clone IRCA825 réputés plus sensibles à la casse au vent. Cette plus grande stabilité des arbres IRCA41 s'explique d'une part par leur houppier moins volumineux, ce qui réduit leur prise au vent. De plus la masse de son houppier étant moins importante, on a de ce fait une faible contribution de cette masse dont le moment fléchissant induit l'inclinaison de la tige par le vent. D'autre part, la stabilité des arbres IRCA41 s'explique aussi par le fait que leur hauteur, moins importante, les conduit à subir des vitesses de vent plus faibles.

Sur le plan mécanique, les expérimentations de flexion sur pied mettent en lumière d'une part (i) que la rigidité de flexion des arbres des clones IRCA825 (clone sensible) et IRCA41 (clone résistant) sont assez similaires. Autrement dit, ces deux clones ont des flexibilités de tronc équivalentes. D'autre part, (ii) la comparaison intra clonale a montré que la rigidité de flexion et le module d'élasticité du bois mesuré en fléchissant les arbres dans la direction des vents dominants sont similaires à ceux mesurés dans la direction perpendiculaire. Ces résultats tendent à indiquer qu'il n'y avait pas encore de signes notables d'un processus d'acclimatation au vent de type thigmomorphogénétique au moment des essais. L'analyse complète de ce volet reste néanmoins complexe du fait d'un manque de données fiables sur les régimes locaux de vent et leur direction sur nos placettes expérimentales. En plus du vent, il faudrait aussi, pour une analyse complète, prendre en considération la dissymétrie liée au schéma de plantation en ligne qui influe probablement fortement sur les efforts subis par les arbres.

La combinaison de l'analyse de la morphologie et du comportement élastique suggère que les arbres IRCA825, avec leur houppier plus important, offrent une prise au vent plus importante avec une tige aux propriétés similaires à IRCA41. On peut donc supposer que les arbres IRCA825 subissent des déformations plus importantes qui peuvent conduire à des niveaux de contraintes plus élevés ; et donc un risque à la rupture plus élevé. En outre, on observe un important contraste entre les deux clones au niveau du comportement lors de la rupture. En effet, les comparaisons interclonales des profils de la contrainte le long du tronc (de bas en haut) au moment de la rupture des tiges a révélé des valeurs nettement plus élevées chez IRCA41 en comparaison avec IRCA825. Ces résultats se retrouvent quelle que soit la hauteur considérée au moment de la rupture et peuvent donc être considérés comme généraux. La rupture intervient logiquement lorsque la contrainte est à son maximum. Elle avait lieu entre 1,5 m et 2,0 m de hauteur, ce qui correspond bien à la hauteur de rupture observée lors des phénomènes de casse au vent. Ainsi donc, bien que les arbres des deux clones présentent des flexibilités équivalentes, les résultats montrent que les IRCA41 ont une résistance du bois plus élevée que les IRCA825.

Ces résultats sur le comportement en rupture, conjugués avec les conclusions sur un probable niveau de contrainte plus important pour IRCA825 en raison de la position et des dimensions de son houppier, conduisent tous vers une plus grande résistance au vent de IRCA41 par rapport à IRCA 825.

Pour mieux comprendre ces différences de comportement mécanique et confirmer les différences de propriété du bois entre les deux clones, nous avons réalisé un échantillonnage de

bois vert sur quelques arbres testés et les avons analysés au laboratoire. Les méthodes d'analyses ainsi que leurs résultats sont décrites dans le chapitre 3.

Chapitre 3: Caractérisation du bois produit par les clones d'hévéa IRCA825 et IRCA41

3.1 Introduction

Les travaux présentés dans ce chapitre ont pour but de comparer les caractéristiques physiques du bois produit par les clones IRCA825 (réputé sensible à la casse au vent) et IRCA41 (réputé résistant à la casse au vent). En effet, comme nous l'avons vu au chapitre précédent, les mesures à l'échelle du tronc semblent indiquer que les deux clones diffèrent principalement au niveau des propriétés de leurs bois respectifs. Aussi pour confirmer ce résultat et comprendre ces différences, nous avons prélevé des échantillons de bois sur quelques arbres testés *in-situ* pour effectuer des essais de caractérisation à une échelle plus fine. On s'intéresse principalement ici à certaines propriétés mécaniques et physiques pouvant expliquer les différences de comportement observé à l'échelle de l'arbre, notamment : le module d'élasticité, le module de rupture, l'infradensité (ou la densité) et l'angle des microfibrilles de cellulose (AMF). Les investigations ont été menées principalement sur des échantillons de bois vert de chaque clone.

3.2 Echantillonnage

Les échantillons ayant servi à la détermination des propriétés du bois ont été prélevés sur 14 arbres du dispositif de flexion sur pied situé au sein de la plantation de Grand Bereby (Cote d'Ivoire), présentés dans le **Tableau 3-I**.

Tableau 3-I: Liste des différents éléments prélevés lors des deux campagnes expérimentales de 2021 et 2022, pour les essais de caractérisations.

Clone	Campagne de mesure	Identification de l'arbre	Code de l'arbre	Nombre et type de matériel
IRCA825	2021	A5L4	A	4 rondelles + 2 planches
IRCA825	2021	A8L4	B	4 rondelles + 2 planches
IRCA825	2021	A6L5	C	4 rondelles + 2 planches
IRCA825	2022	A4L4	G	2 rondelles + 1 planches
IRCA825	2022	A9L3	H	2 rondelles + 1 planches
IRCA825	2022	A17L3	I	2 rondelles + 1 planches
IRCA825	2022	A30L5	J	2 rondelles + 1 planches
IRCA41	2021	A37L5	D	4 rondelles + 2 planches
IRCA41	2021	A29L5	E	4 rondelles + 2 planches
IRCA41	2021	A43L9	F	4 rondelles + 2 planches
IRCA41	2022	A26L18	K	2 rondelles + 1 planches
IRCA41	2022	A29L11	L	2 rondelles + 1 planches
IRCA41	2022	A30L11	M	2 rondelles + 1 planches
IRCA41	2022	A48L9	N	2 rondelles + 1 planches

Tableau 3-II: Identification des différents échantillons de bois après usinage des planches, pour les essais de caractérisation. Les rondelles sont numérotées du bas vers le haut, tandis que les barreaux sont numérotés arbitrairement d'une extrémité à l'autre de la planche.

Clone	Code de l'arbre	Identification des rondelles	Identification des planches	Identification des barreaux
IRCA825	A	RA1, RA2, RA3, RA4	A1	A11, A12, A13, A14, A15
			A2	A21, A22, A23, A24
IRCA825	B	RB1, RB2, RB3, RB4	B1	B11, B12, B13, B14, B15, B16
			B2	B21, B22, B23, B24, B25, B26
IRCA825	C	RC1, RC2, RC3, RC4	C1	C11, C12, C13, C14, C15, C16

			C2	C21, C22, C23, C24, C25
IRCA825	G	RG1, RG2	G	G1, G2, G3, G4, G5, G6, G7, G8
IRCA825	H	RH1, RH2	H	H1, H2, H3, H4, H5, H6, H7, H8
IRCA825	I	RI1, RI2	I	I1, I2, I3, I4, I5, I6, I7, I8
IRCA825	J	RJ1, RJ2	J	J1, J2, J3, J4, J5, J6, J7, J8
IRCA41	D	RD1, RD2, RD3, RD4	D1	D11, D12, D13, D14, D15
			D2	D21, D22, D23, D24, D25
IRCA41	E	RE1, RE2, RE3, RE4	E1	E11, E12, E13, E14, E15, E16
			E2	E21, E22, E23, E24, E25, E26
IRCA41	F	RF1, RF2, RF3, RF4	F1	F11, F12, F13, F14, F15, F16
			F2	F21, F22, F23, F24, F25
IRCA41	K	RK1, RK2	K	K1, K2, K3, K4, K5, K6, K7, K8
IRCA41	L	RL1, RL2	L	L1, L2, L3, L4, L5, L6, L7, L8
IRCA41	M	RM1, RM2	M	M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8
IRCA41	N	RN1, RN2	N	N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7, N8

Les échantillons A, B, C, D, E et F ont été prélevés lors de la première campagne expérimentale de 2021 sur les 6 arbres abattus (**Tableau 3-I**). Les résultats présentés au Chapitre 2 ont montré des différences entre le module d'élasticité mesuré à 1 m et celui mesuré à 1,70. Nous avons voulu vérifier ces variations de module sur des échantillons de bois. Aussi, après l'abattage de l'arbre et la pesée du tronc, nous avons prélevé deux billons de 70 cm environ entre la base du tronc et 1 m, puis entre 1 m et 1,70 m ; soit 12 billons au total. De chaque billon nous avons extrait deux rondelles de 4 cm environ d'épaisseur (prélevée de part et d'autre du billon) et une planche diamétrale de même épaisseur. Nous avons obtenu ainsi 24 rondelles et 12 planches diamétrale sur ces 6 arbres, lors de cette campagne de mesure de 2021. Les échantillons G, H, I, J, K, L, M et N ont été prélevés quant à eux lors de la seconde campagne expérimentale de 2022 après les tests de rupture. Du fait de la fissuration du tronc lors de la rupture de l'arbre, nous n'avons pu extraire qu'un seul billon sur chaque arbre. Nous avons obtenu ainsi 8 billons au total lors de la campagne de mesure de 2022, elles nous ont donné 16 rondelles et 8 planches (**Tableau 3-I**). Après chaque campagne de mesure, le matériel végétal récolté a été à chaque fois emballé hermétiquement, acheminé à l'UMR-PIAF (Clermont-Ferrand) et conservé dans une chambre froide à environ 7° C et à 70% d'humidité relative, avant les essais de caractérisation.

Les deux groupes de planches A, B, C, D, E et F, ont été usinées afin d'obtenir 66 barreaux (4 à 6 par planche en fonction de leur dimensions) : 32 barreaux pour IRCA825 et 34 barreaux pour IRCA41 (**Tableau 3-II**), dont les dimensions étaient d'environ 15×50×450 mm³ (R×T×L), après rabotage des faces (pour avoir de face plane). En ce qui concerne le lot de planches G, H, I, J, K, L, M et N, nous en avons extrait 64 barreaux (8 par planche), soit 32 barreaux par clone (**Tableau 3-II**). Après avoir coupé des bouts et raboté les faces, les dimensions étaient de 17×25×410 mm³ (R×T×L). Au cours de l'usinage de cette seconde série d'échantillons, nous avons bien pris soins de noter la position diamétrale de chaque planchette. La **Figure 3-1** présente les schémas de débit des échantillons et leur destination pour les différents essais de caractérisation.

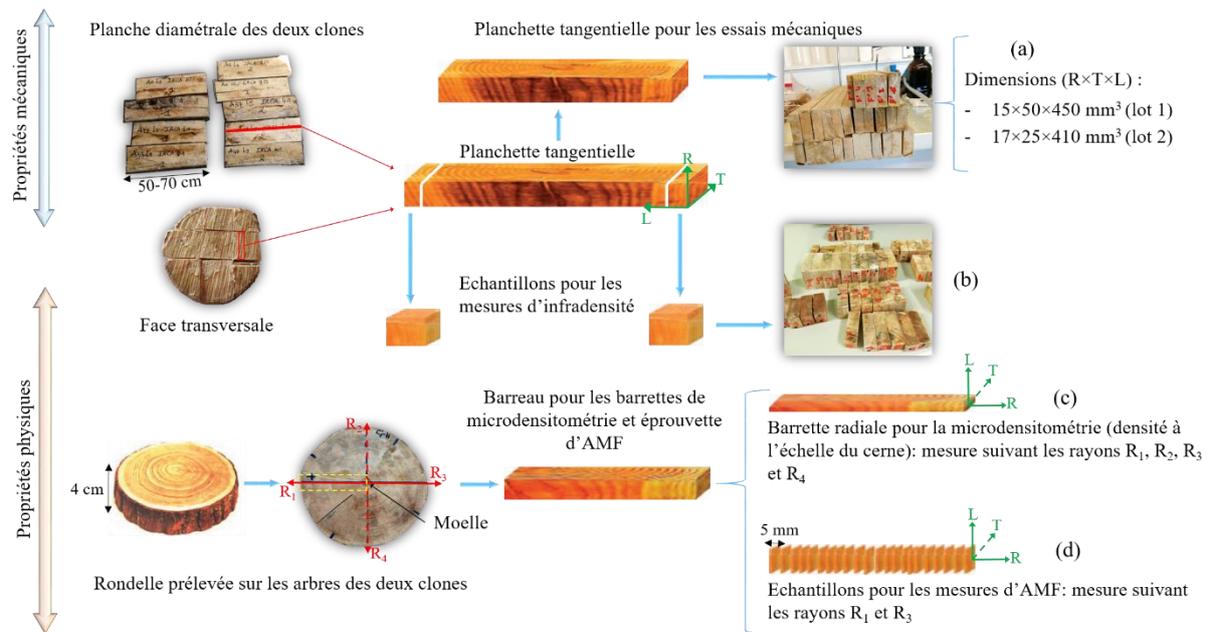


Figure 3-1: Echantillonnage et schéma de débit des différents échantillons pour la détermination des propriétés mécanique (a) et physiques (b, c et d).

3.3 Méthodes

3.3.1 Mesure de propriétés physiques et mécaniques sur barreaux de bois

Les essais de caractérisation des barreaux de bois étaient globalement de trois sortes :

- Des essais mécaniques non-destructifs, par la méthode du BING, pour la détermination des paramètres élastiques ;
- Des essais mécaniques destructifs, par des tests de flexion 3 points ou 4 points, pour la détermination des paramètres élastiques et de rupture ;
- Des mesures d'infradensité.

3.3.1.1 Mesure non-destructive par la méthode du BING

La méthode du BING est une méthode non-destructive de détermination des caractéristiques élastiques du bois développée par le CIRAD (Brancheriau et Paradis, 2007). Elle est basée sur l'analyse des vibrations d'un échantillon de bois suite à un choc. En effet, l'analyse dimensionnelle montre que le rapport du module d'élasticité à la masse volumique, appelé aussi « module spécifique », est homogène au carré d'une vitesse. Celle-ci correspond à la vitesse de propagation d'un signal dans le matériau. Cette relation indique la liaison existant entre propriétés mécaniques et comportement vibratoire. L'analyse des vibrations naturelles de flexion ou de compression d'un échantillon de bois permet d'identifier les fréquences propres dudit échantillon à la suite d'une excitation à une extrémité (Brancheriau, 2002, 2006; Brancheriau et al., 2010).

Le dispositif d'essai est constitué d'un microphone de type EMU4535 (**Figure 3-2a**), qui capte les vibrations rayonnées sans contact et convertit les ondes acoustiques en tension électrique (par variation de pression). Ce dernier est relié au Picoscope 4224 IEPE (**Figure 3-2b**), convertisseur analogique-numérique dont la résolution est de 12 bits. La fréquence d'échantillonnage a été réglée à 60,1 kHz et la durée d'acquisition était de 1,1 s. L'ensemble

est piloté par le logiciel 'BING' donc les paramètres d'entrée sont : la masse de l'échantillon et ses dimensions (longueur, hauteur et épaisseur).

En pratique, l'échantillon à tester est posé sur deux appuis souples (deux élastiques, voir **Figure 3-2a**) afin que la vibration soit aussi libre que possible. Une percussion est exercée sur une extrémité de l'échantillon (suivant la direction tangentielle pour la flexion et longitudinale pour la compression). Un microphone est placé à l'autre extrémité (de façon colinéaire à la direction de la percussion). Les deux lots de barreaux présentés sur la **Figure 3-1a** ont été testés ainsi. Chaque essai a été réalisé 2 ou 3 fois et le résultat final (pour un échantillon) correspond à la moyenne de ces différents essais.

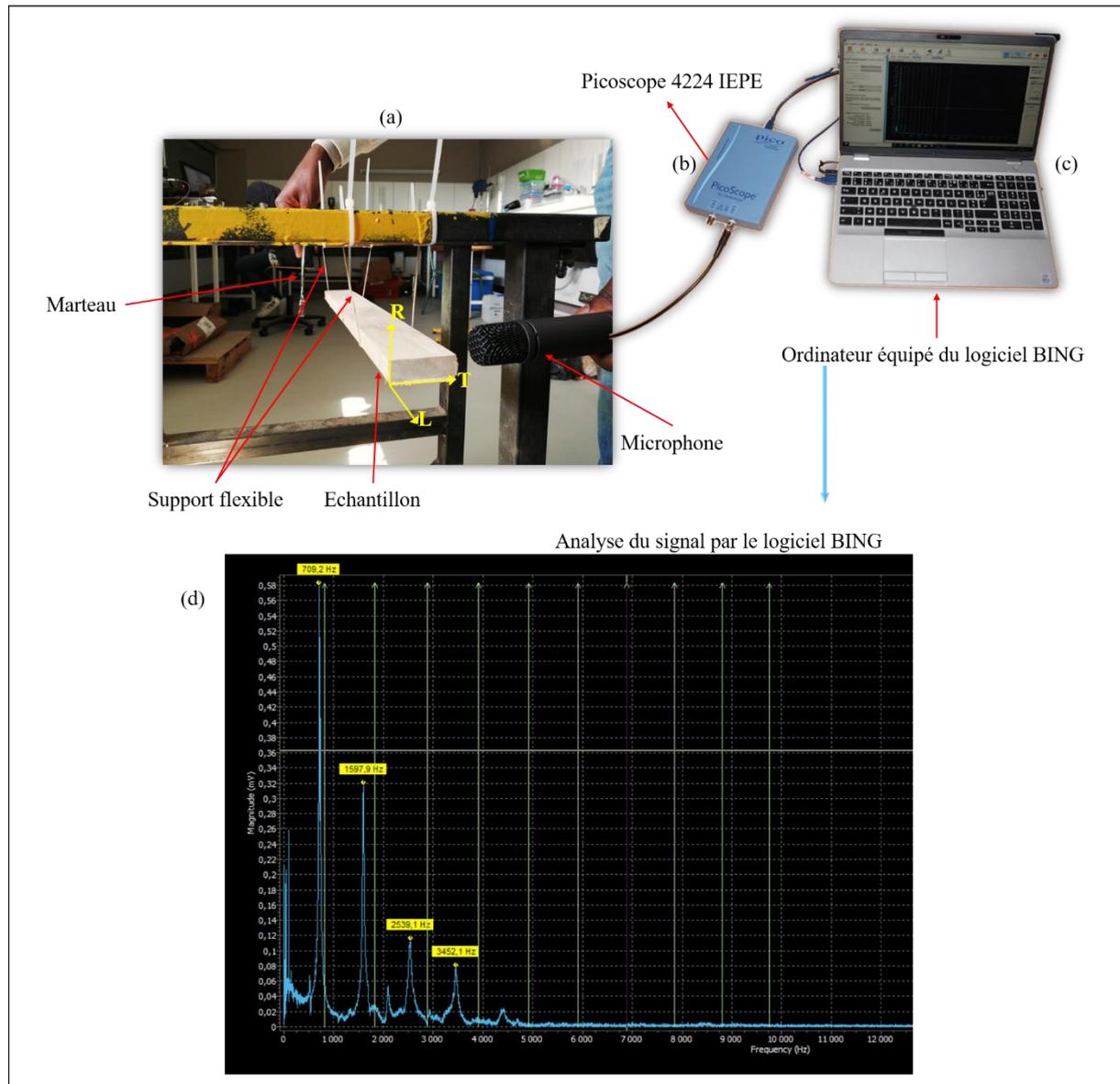


Figure 3-2: a. Dispositif expérimental de l'essai de flexion/compression dynamique par la méthode BING. La percussion est exercée à l'aide d'un instrument rigide (ici une clé plate fait office de marteau) suivant la direction tangentielle. Le signal est capté par le microphone, converti par le Picoscope (b) et analysé en fréquence par le logiciel BING. d. Exemple d'analyse du signal pour un échantillon, les 4 pics de la courbe en bleu correspondent aux fréquences mesurées et les barres verticales en vert correspondent aux fréquences calculées par le modèle de Bernoulli ou Timoshenko.

L'analyse du signal acoustique à partir du logiciel (**Figure 3-2d**) 'BING' est basée sur deux modèles : un modèle simple développé par Bernoulli et un modèle plus élaboré développé par Timoshenko. Ce dernier modèle est décrit par l'équation suivante (Brancheriau, 2002, 2006; Brancheriau et al., 2010) :

$$\frac{E}{\rho} = \frac{E}{K \cdot G_{TL}} x_n + y_n \quad (3.1)$$

où : E et G_{TL} sont respectivement les module d'élasticité dynamique (E_{dyn}) et de cisaillement, ρ la densité du bois définie au paragraphe §1.1.4.2.1 et K un facteur de forme qui dépend de la géométrie de la section. Les valeurs de E et G_{TL} sont calculées par régression linéaire avec des paramètres (x_n, y_n) définis par les équations suivantes (Brancheriau, 2002) :

$$x_n = 4\pi^2 \frac{S \cdot L^4 \cdot f_n^2}{I_{Gz} \cdot P_n} \cdot \frac{\rho \cdot I_{Gz} \cdot \omega^2}{L^2 \cdot (\rho \cdot S \cdot \omega^2 - k)} F_2(m) \quad (3.2)$$

$$y_n = 4\pi^2 \frac{S \cdot L^4 \cdot f_n^2}{I_{Gz} \cdot P_n} \left[1 + \frac{\rho \cdot I_{Gz} \cdot \omega^2}{L^2 \cdot (\rho \cdot S \cdot \omega^2 - k)} F_1(m) \right] \quad (3.3)$$

Avec S la surface de la section transversale, L la longueur de l'échantillon, I_{Gz} le moment quadratique, f_n la fréquence de vibration du mode n, ω la pulsation propre de la vibration et k la rigidité du support élastique. Les paramètres $F_1(m)$ et $F_2(m)$ dépendent de la solution de Bernoulli P_n (solution du mode n) de l'équation d'onde décrit par Brancheriau et Baillères (2002).

Il faut noter que le modèle de Bernoulli ne prend pas en compte le cisaillement entre les sections droites d'une poutre. En d'autres termes, les sections de la poutre restent perpendiculaires à la ligne neutre de la poutre. Par contre, le modèle de Timoshenko tient compte d'un angle de cisaillement qui reflète que les sections droites ne restent pas perpendiculaires à la ligne neutre. Ces modèles étant valables pour un ratio longueur sur hauteur fléchiée de 20 pour celui de Bernoulli et de 10 pour celui de Timoshenko (Brancheriau, 2006), ce dernier modèle est donc plus adapté aux dimensions de nos échantillons.

3.3.1.2 Essais de flexion 3 points

Les essais de flexion 3 points ont été effectués à la suite des tests non-destructifs (méthode du BING), pour caractériser les échantillons jusqu'à la rupture. Ils ont été réalisés en 2021 sur les 66 échantillons (des deux clones) dont les dimensions étaient inchangées ($15 \times 50 \times 450 \text{ mm}^3$) (**Figure 3-1a**). Le dispositif expérimental utilisé pour ces essais est une presse mécanique INSTRON 5565 (disponible à l'UMR PIAF) équipée d'une cellule de charge de capacité 5 kN (**Figure 3-3a**). Chaque test pouvait se décomposer globalement en deux étapes : d'abord on assure le contact de l'appui central avec l'échantillon posé sur deux appuis simples. Ensuite, on effectue une pré-charge de 10 N qui est immédiatement suivie du chargement linéaire en déplacement jusqu'à la rupture de l'échantillon. La vitesse de déplacement de la traverse était fixe et imposée à 5 mm/min.

Le logiciel associé à l'INSTRON 5565 enregistre le déplacement de la traverse et la force appliquée à l'échantillon au cours du chargement. Les fichiers de données ainsi obtenus ont été analysés à l'aide d'un script développé en Python et adapté pour nos essais (F. Hartmann, PIAF). Ce script est basé sur les équations de RDM classiques (**Figure 3-3b**), pour un essai de flexion 3 points et extrait la valeur de module élastique en flexion 3 points (E_{F3P})

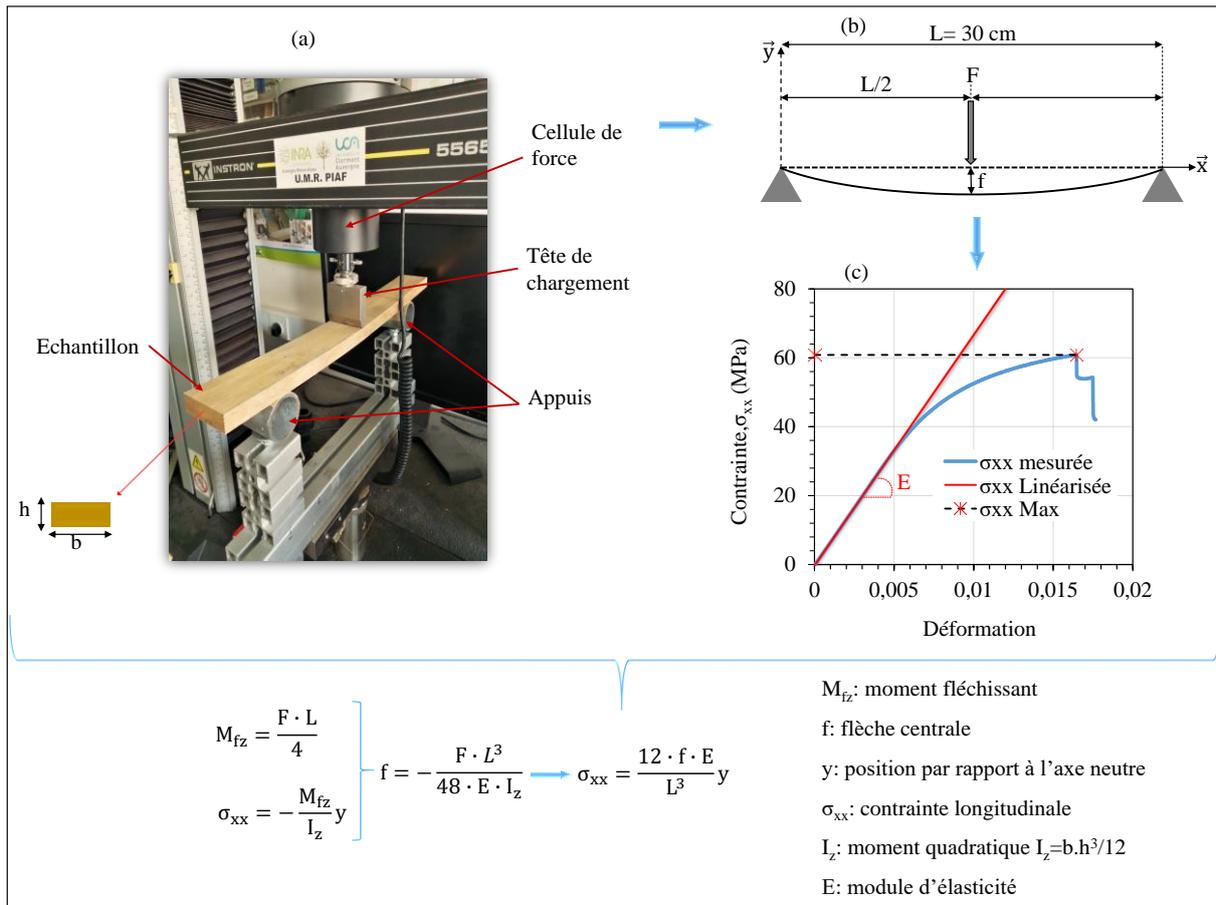


Figure 3-3: a. Dispositif expérimental de l'essai de flexion 3 points. b. Schématisation de l'essai. c. Exemple de courbe contrainte déformation d'un essai de flexion 3 points.

3.3.1.3 Essais de flexion 4 points

Les essais de flexion 4 points ont été effectués à la suite des essais non-destructifs de 2022, sur 64 échantillons (32 par clones) de dimension $17 \times 25 \times 410 \text{ mm}^3$ (**Figure 3-1a**). Ce changement de méthode d'essai par rapport à 2021 était lié à la disponibilité d'un nouveau système (plus précis) pour la mesure des déplacements. Le dispositif expérimental utilisé ici est une presse mécanique ZwickRoell (série n° 1001136, disponible à l'Institut Pascal) équipée d'une cellule de charge de 50 kN (**Figure 3-4**). Cette presse est également équipée d'un extensomètre vidéo videoXtens 3-300 ([videoXtens 3-300 | ZwickRoell](#)), qui permet la mesure de déplacement au cours de l'essai sans contact. La mesure de déplacement à l'aide d'un extensomètre vidéo est basé sur la méthode de suivi de marqueurs.

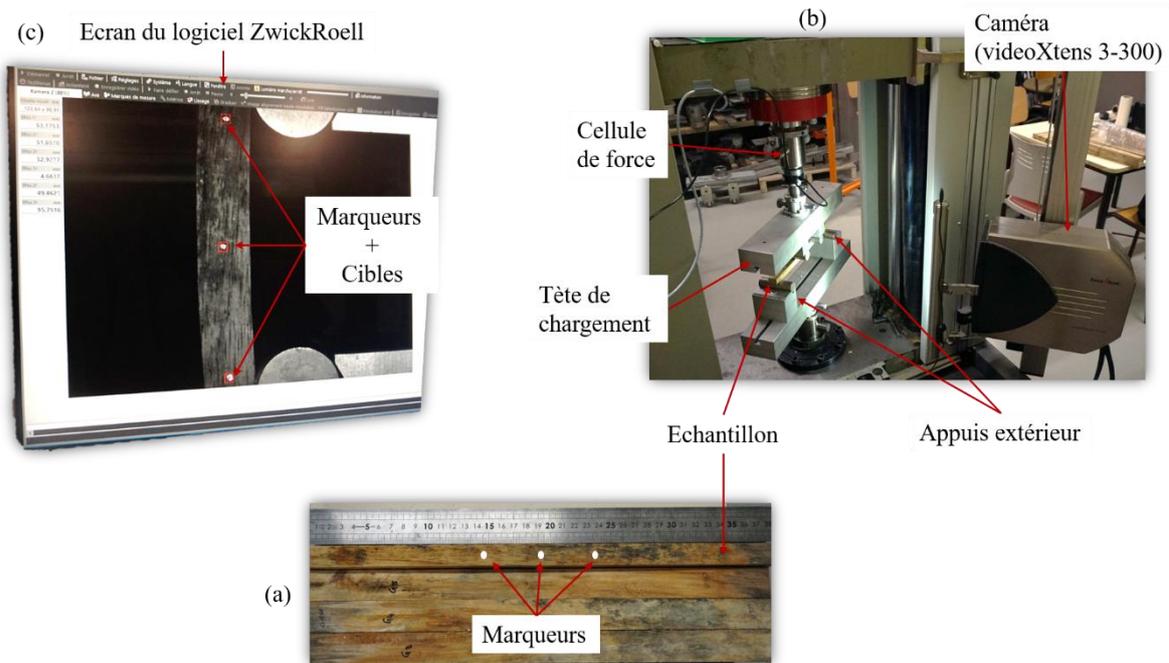


Figure 3-4: Dispositif expérimental de l'essai de flexion 4 points. Mesure du déplacement sans contact à l'aide d'un extensomètre vidéo videoXtens 3-300

En pratique avant le démarrage du test, une phase de préparation des échantillons était nécessaire. Tout d'abord on trace 3 marques sur une des faces latérales de l'échantillon (**Figure 3-4**). La première marque est placée au centre de la face et à égale distance des extrémités ; tandis que les deux autres marques sont placées de part et d'autre de la première à environ 4,5 cm. Ensuite, on pose l'échantillon sur les appuis de la presse, en tournant la face marquée du côté de la caméra. Puis on positionne des cibles virtuelles du logiciel ZwickRoell sur les 3 marques de l'échantillon et on effectue une calibration. Lors de la phase de calibration, le logiciel détecte les 3 marques et recalcule leurs positions $(x_i, y_i)_{i=1,2,3}$ (**Figure 3-5a**) à partir de la distance entre les appuis inter et externe, que l'on indique au préalable dans le logiciel. Avant le lancement de l'essai on met en contact les deux appuis centraux avec l'échantillon. Une fois cette dernière étape terminée, on peut lancer l'essai. Le lancement de l'essai commence par une pré-charge de 10 N, puis se poursuit par un chargement jusqu'à la rupture de l'échantillon. La vitesse de chargement ici était de 4 mm/min.

Durant toute la durée de l'essai, le logiciel ZwickRoell enregistre les positions $(x_i, y_i)_{i=1,2,3}$ des 3 marqueurs au cours du temps, ainsi que la force appliquée. Pour l'analyse des données de ces essais de flexion 4 points, nous avons également utilisé les équations de la RDM classique, notamment celle qui lie la courbure de la section au moment fléchissant (**Figure 3-5b**). La méthode de calcul est détaillée sur la **Figure 3-5**.

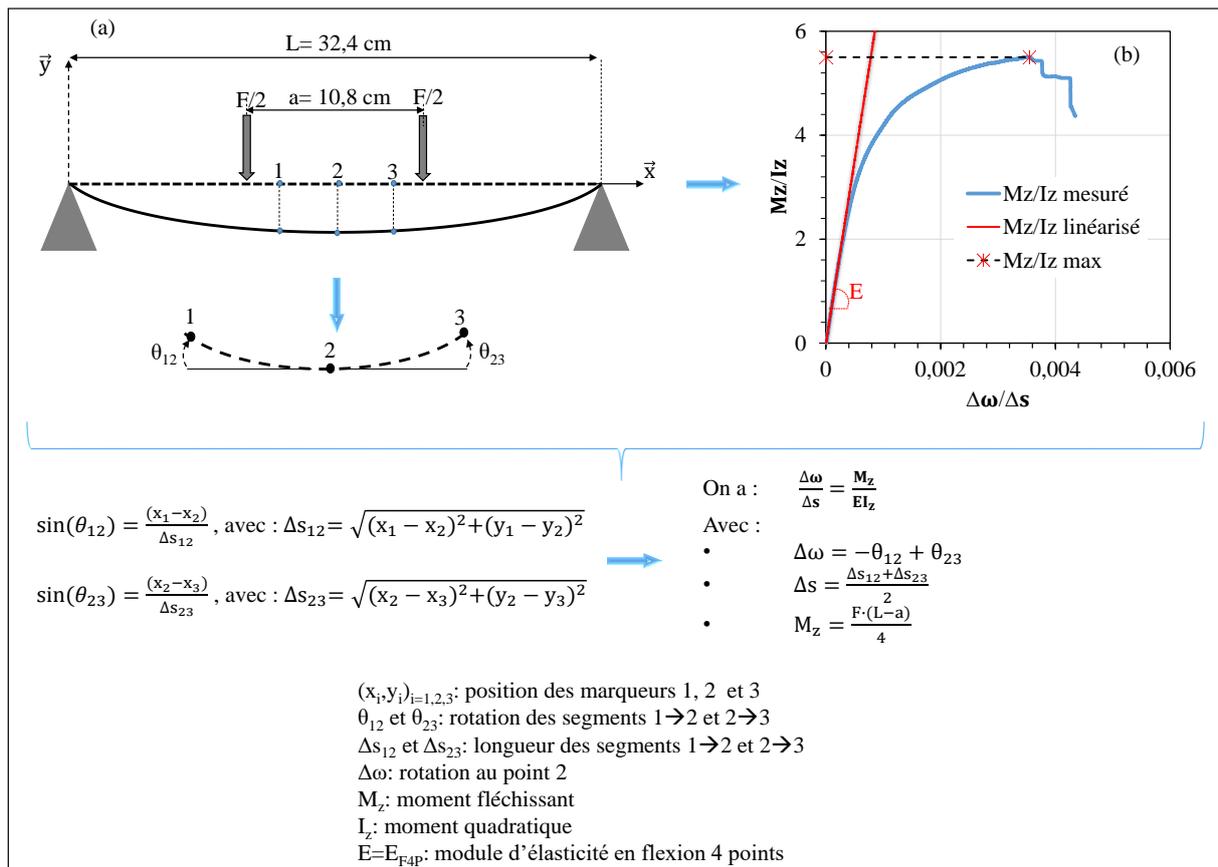


Figure 3-5: a. Schématisation de l'essai de flexion 4 points, avec la mesure du déplacement par suivi de marqueurs. b. Représentation graphique de la relation entre la courbure et le moment fléchissant.

3.3.1.4 Mesure de l'infradensité

Les mesures d'infradensité ont été réalisées sur des petits cubes de bois prélevés de part et d'autre de chaque barreau (**Figure 3-1b**). Rappelons ici que l'infradensité est définie comme le rapport entre la masse anhydre d'un échantillon et son volume saturé en eau (voir §1.1.4.2.1). Ainsi, deux paramètres sont nécessaires pour sa détermination, à savoir : le volume de l'échantillon saturé en eau et sa masse anhydre.

Pour la détermination du volume saturé nous avons utilisé la méthode de la pesée hydrostatique qui permet de mesurer le volume de n'importe quel corps, même de forme irrégulière comme nos échantillons. Tout d'abord, on pose un récipient contenant de l'eau sur une balance de précision et on tare la balance (balance de marque OHAUS et de précision 0,1 mg). Ensuite, à l'aide d'une aiguille fixée à une potence, on vient piquer l'échantillon ; ce qui permet de le maintenir complètement immergé sans toucher les bords du récipient. Enfin, on relève la valeur de masse indiquée par la balance (**Figure 3-6a**). Le volume de l'échantillon saturé et déduit de cette masse selon le principe d'Archimède (le volume d'un corps immergé est égal au volume du liquide déplacé).

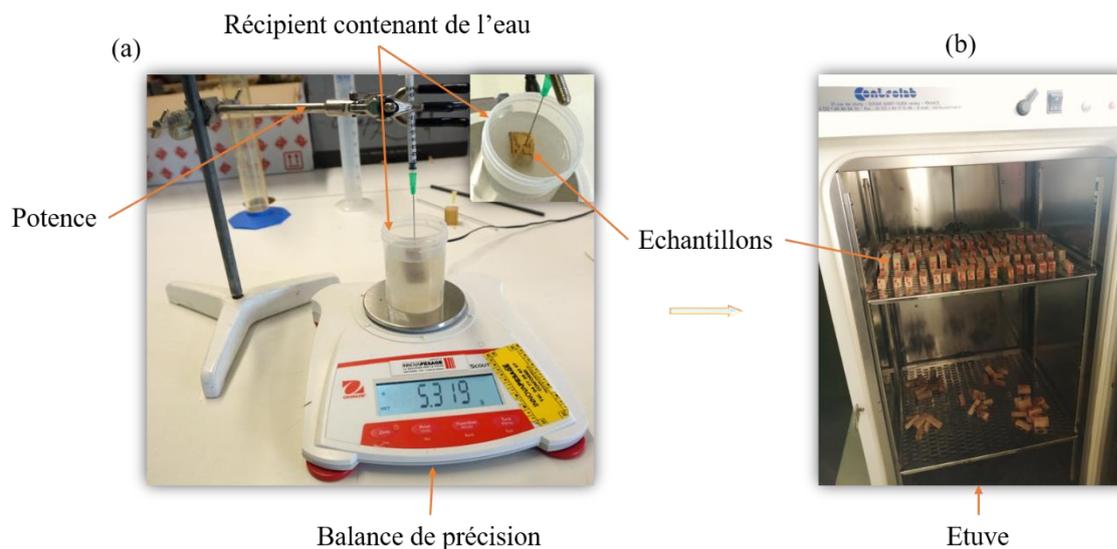


Figure 3-6: Mesure du volume saturé (a) et de la masse sèche (b) des échantillons de bois. La mesure du volume saturé utilise le principe d'Archimède consistant à mesurer le volume d'un échantillon en mesurant par pesée le volume d'eau qu'il déplace lorsqu'il est immergé dans un liquide.

Pour la détermination de la masse anhydre, les échantillons ont été séchés à l'étuve à 103° C (**Figure 3-6b**). Après un peu plus de 24 h à l'étuve, ils ont été sortis un à un et pesés. La valeur finale de l'infradensité a été obtenue en faisant la moyenne des valeurs des deux échantillons issus de chaque planchette.

3.3.2 Mesure de paramètres physiques sur rondelles de bois : densité à l'échelle du cerne et angle de microfibrilles

Les mesures de densité à l'échelle des cernes et des angles de microfibrilles ont été réalisées uniquement sur 6 des rondelles (*RA3, RB3, RC3, RD3, RE3 et RF3*, voir **Tableau 3-II**), prélevées lors de la première campagne d'essai de 2020-2021 ; à raison d'une rondelle par arbre. Les 6 rondelles (à raison de 3 rondelles par clones) ont été envoyées à la plateforme SILVATECH de Nancy, où les mesures de micro densité et d'angles de microfibrilles ont été effectuées. Les méthodes utilisées pour la détermination de ces paramètres physiques sont les mêmes que celles décrites dans Zue Ondo et al (2021).

3.3.2.1 Mesure de densité à l'échelle du cerne

Les mesures de densité à l'échelle du cerne ont été effectuées par microdensitométrie à rayons X. Tout d'abord, des barrettes de 2 mm d'épaisseur environ ont été prélevées suivant les 4 rayons en partant de la moelle (**Figure 3-1c**). Ces barrettes ont par la suite été stabilisées entre 12 et 15% d'humidité et ensuite scannées au microtomographe. Cette étape a permis d'obtenir des images radiographiques de chaque barrette. Ces images ont enfin été analysées à l'aide du programme CERD 2.8 (Mothe et al., 1998), qui a permis de délimiter les cernes et d'en calculer les valeurs de densité. Toutefois, la limite des cernes n'étant pas visible chez l'hévéa comme chez la plupart des essences tropicales (voir §1.1.2.3), des faux cernes de 2 mm ont donc été tracés. Le logiciel CERD 2.8 découpe chaque faux cerne en vingt parties et donne une valeur de densité tous les 100 µm de la moelle vers l'écorce.

3.3.2.2 Mesure de l'angle de microfibrilles (AMF)

Pour les mesures d'AMF, des barrettes radiales ont été prélevées suivant les rayons R_1 et R_3 comme illustré sur la **Figure 3-1d**. Ces barrettes ont été découpées de la moelle vers l'écorce

avec un pas de 5 mm et 3 mesures ont été réalisées sur chaque échantillon ainsi obtenu. La valeur finale d'AMF d'un échantillon correspond alors à la moyenne des 3 mesures réalisées.

Ces mesures ont été réalisées à l'aide d'un diffractomètre « Oxford Diffraction Super Nova ». Les échantillons sont bombardés sur la face tangentielle, à l'aide d'un faisceau de rayon X Cu-K α de longueur d'onde $\lambda = 1,542 \text{ \AA}$ et de diamètre 300 μm . Les résultats sont enregistrés sous forme de diffractogrammes traduisant les pics de diffraction. L'AMF est corrélé à la largeur du pic de diffraction du plan 002 de la cellulose selon l'expression : $\text{AMF} = 0,6.T$, ou T est la demi-largeur du pic de diffraction (Cave, 1997; Zue Ondo et al., 2021).

3.3.3 Méthode de calcul des profils moyens des variations de propriétés

Les mesures sur les barreaux de bois de 2022 permettent d'obtenir des profils des variations de propriétés mesurées par planche et donc par arbre. Pour avoir des profils par clone (pour une comparaison interclonale), une moyenne de tous les profils par arbre de chaque clone est nécessaire. Toutefois, cette moyenne ne pouvait être faite de façon systématique car toutes les planches n'avaient pas toujours le même nombre de barreaux sur chaque rayon. Et de plus, tous barreaux situés sur chaque rayon d'une planche ne sont pas à égale distance de la moelle. Pour contourner cette hétérogénéité dans l'échantillonnage, nous avons réuni les barreaux de chaque clone par groupe, selon leur distance à la moelle. Le groupe (gpe) auquel appartient un barreau est calculé de la façon suivante :

$$\text{gpe} = \text{ENT} \left(\frac{\text{distance à la moelle du barreau}}{N} \right) \quad (3.4)$$

$$N = \frac{2 \cdot \text{Longueur max du rayon}}{\text{nombre max de barreaux par diamètre}} + 0,001 \quad (3.5)$$

où ENT(x) est la partie entière de x.

Une fois tous ces groupes déterminés, nous avons effectué des moyennes par groupe, des positions radiales comme des valeurs, pour constituer notre profil.

Le même principe de regroupement par classes a été utilisé pour l'analyse des profils de micro densité et d'AMF des rondelles.

3.4 Résultats

3.4.1 Résultats des mesures non-destructives de propriétés physiques et mécaniques sur les barreaux de bois

Les essais de caractérisations non-destructifs ont été réalisés sur les deux lots de barreaux de bois issus des planches de 2021 et de 2022 (**Tableau 3-1**). Ils ont permis d'obtenir l'infradensité (ID) et le module d'élasticité dynamique (E_{dyn}) des différents barreaux de chaque planche.

3.4.1.1 Résultats sur la caractérisation non destructive des barreaux de bois de 2021

En 2021, l'absence d'information sur la position diamétrale des barreaux des différentes planches n'a pas permis de constituer un profil des variations de l'infradensité et du module d'élasticité E_{dyn} . Les histogrammes de la **Figure 3-7** présentent la distribution des valeurs d'infradensité et de module d'élasticité E_{dyn} des différents barreaux des échantillons pour IRCA825 et IRCA41. Chez le clone IRCA825, cette figure montre que les barreaux B25 et C16 ont des valeurs d'infradensité très au-dessus de la moyenne qui est de $0,49 \pm 0,02$ (respectivement 0,53 et 0,58). Tandis que le barreau C23 a la valeur la plus faible (0,45), en-dessous de cette moyenne (**Figure 3-7a**). En ce qui concerne le module d'élasticité dynamique mesuré par la méthode BING, E_{dyn} , la **Figure 3-7c** montre que le barreau B24 a une valeur un peu plus au-dessus de la moyenne de l'ensemble qui est de $10,4 \pm 1,1$ GPa, avec 13,0 GPa. Le barreau A11 a quant à lui la valeur la plus faible de l'ensemble, avec 8,7 GPa.

Chez le clone IRCA41, la **Figure 3-7b** montre que les valeurs d'infradensité des différents barreaux sont assez homogènes autour de la moyenne de l'ensemble qui est de $0,57 \pm 0,01$. La valeur maximale de l'infradensité est de 0,60 (barreau F15) et la minimale de 0,54 (barreau F21). La distribution du module d'élasticité E_{dyn} du clone IRCA41 présente des valeurs très au-dessus de la moyenne ($12,0 \pm 1,1$ GPa) sur les barreaux D13 et D14 (respectivement 15,1 et 14,5 GPa). Les barreaux F14 et F24 ont quant à eux les valeurs les plus faibles, avec respectivement 10,0 et 10,2 GPa (**Figure 3-7d**).

En plus des observations précédentes, on note sur la **Figure 3-7**, des différences interclonales assez importante de ID et le module d'élasticité E_{dyn} moyens mesurés sur les 3 planches de chaque clones ; le clone IRCA825 ayant les valeurs moyennes les plus faibles comparativement au clone IRCA41.

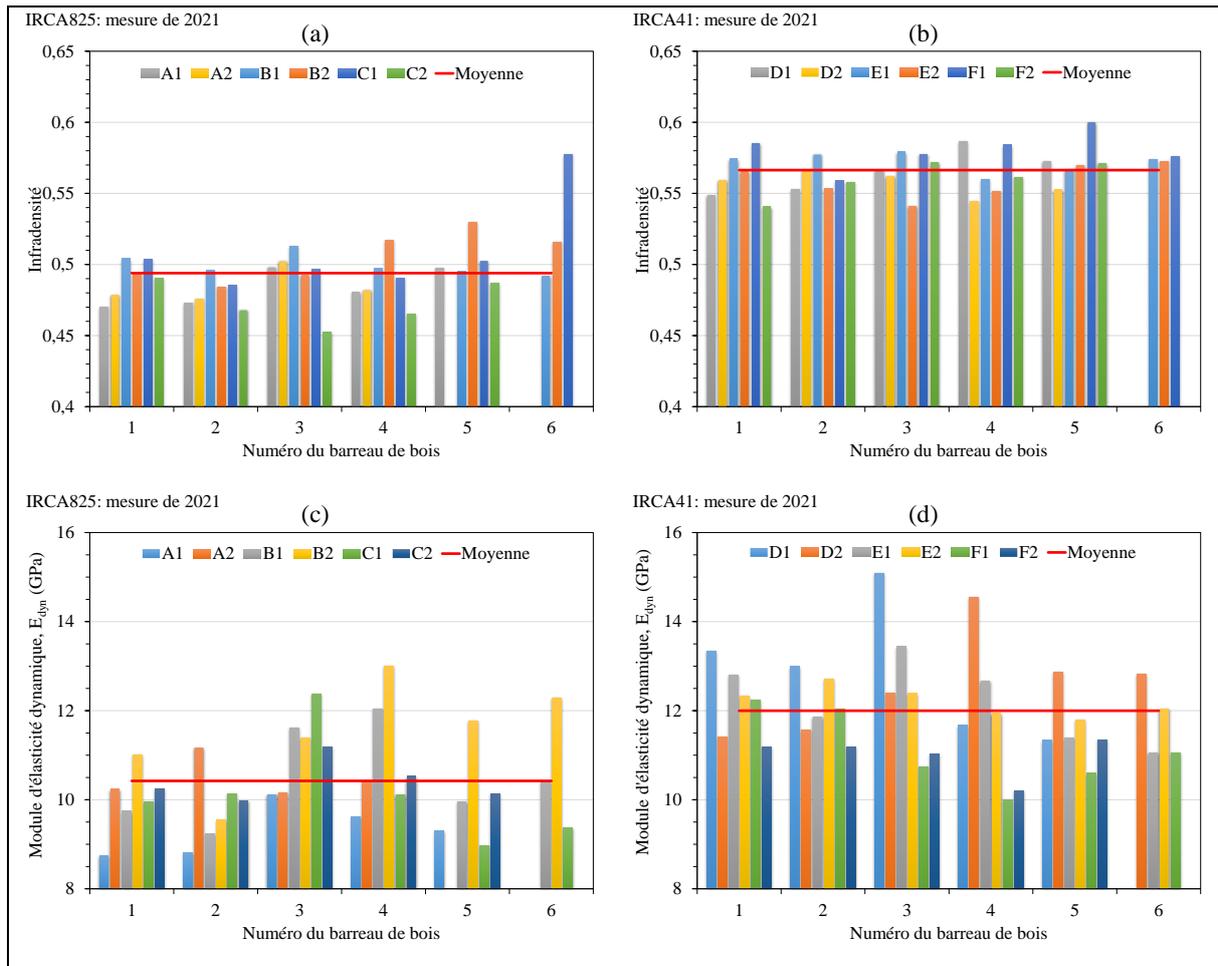


Figure 3-7: Distribution des valeurs d'infradensité mesurées sur les barreaux issus du lot de planches (A1, A2, B1, B2, C1, C2) du clones IRCA825 (a) et du lot de planches (D1, D2, E1, E2, F1, F2) du clone IRCA41 (b). Distribution des valeurs de module d'élasticité dynamique E_{dyn} mesurées sur les barreaux issus du lot de planches (A1, A2, B1, B2, C1, C2) du clone IRCA825 (c) et du lot de planches (D1, D2, E1, E2, F1, F2) du clone IRCA41 (d). La barre horizontale correspond à la moyenne de l'ensemble des barreaux du clone considéré.

Il est difficile de comparer entre les différentes planches les barreaux de même numéro, parce que le sens de la numérotation de ces barreaux était arbitraire entre les planches. De plus, toutes les planches n'avaient pas nécessairement le même nombre de barreaux. Néanmoins pour chaque clone, la comparaison des planches prélevées à deux hauteurs différentes sur l'arbre reste possible ('planche 1', prélevée entre la base et 1 m et 'planche 2', prélevée entre 1 et 1,7 m).

Le **Tableau 3-III** présente l'infradensité et le module d'élasticité E_{dyn} moyen des planches 1 et 2 prélevées à des hauteurs différentes sur les arbres des clones IRCA825 et IRCA41. Pour le premier clone, ce tableau montre que la différence de 2% observée entre l'infradensité moyenne des planches du bas (planche 1) et celle du haut (planche 2) n'est pas significative. La p-value du test de comparaison bilatérale étant de 0,235, supérieure au seuil de signification de 0,05. Ce tableau montre en revanche que la différence de 8% entre les modules d'élasticité E_{dyn} des deux planches est significative. La p-value du test de comparaison bilatérale étant de 0,026.

A l'inverse, chez le clone IRCA41, on remarque que l'infradensité est systématiquement supérieure de +3% au niveau de la planche 1 (en bas de l'arbre) comparativement à la planche 2. Le test de comparaison bilatéral effectué montre que cette différence est significative ($p=$

0,002). En revanche, le module d'élasticité E_{dyn} moyen mesuré sur les planches 1 est équivalent à celui mesuré sur les planches 2.

Tableau 3-III : Valeur moyenne de l'infradensité, du module d'élasticité dynamique (E_{dyn}) et du rapport E_{dyn}/ID , pour tous les barreaux issus des planches prélevés à la même hauteur. 'Planche 1', prélevé entre la base et 1 m et 'Planche 2', prélevé entre 1 et 1,7 m. Les moyennes sont données avec \pm un écart-type. S : différence significative, NS : différence non-significative.

Clone	Echantillon	Infradensité, ID	Module d'élasticité, E_{dyn} (GPa)	Rapport E_{dyn}/ID (GPa)
IRCA825	Planche 1	0,50 \pm 0,02	10,0 \pm 1,1	20,1 \pm 2,2
	Planche 2	0,49 \pm 0,02	10,9 \pm 0,9	22,2 \pm 1,6
	p-value et niveau de signification	0,235 NS	0,026 S	0,005 S
IRCA41	Planche 1	0,57 \pm 0,01	12,0 \pm 1,3	21,0 \pm 2,5
	Planche 2	0,56 \pm 0,01	12,0 \pm 1,0	21,4 \pm 1,9
	p-value et niveau de signification	0,002 S	0,821 NS	0,648 NS

Le **Tableau 3-III** présente également les valeurs moyennes du rapport E_{dyn}/ID , en plus de celles de l'infradensité et du module d'élasticité E_{dyn} . Chez le clone IRCA825, ce rapport varie en moyenne de 20,1 \pm 2,2 GPa à 22,2 \pm 1,6 GPa entre les planches du bas et celles situées plus haut dans l'arbre ; ce qui fait une différence de 10%, significative d'après le test de comparaison bilatérale ($p=0,005$). En revanche, pas de différence significative ($p=0,648$) du rapport E_{dyn}/ID chez le clone IRCA41 entre les 2 hauteurs de prélèvement avec une valeur moyenne de ce rapport respectivement 21,0 \pm 2,5 (en bas) et 21,4 \pm 1,9 (plus haut).

3.4.1.2 Résultats sur la caractérisation non destructive des barreaux de bois de 2022

En 2022, une nouvelle série de mesures d'infradensité (ID) et de module d'élasticité dynamique (E_{dyn}) a été effectuée sur un nouveau lot de barreaux de chaque clone, issus de 8 planches différentes (planches G, H, I, J, K, L, M et N ; voir **Tableau 3-I**). Mais à la différence des essais de 2021, la position par rapport à la moelle des différents barreaux ici a été bien identifiée. Ces positions ont permis de constituer les profils des variations diamétrales de l'infradensité et du module d'élasticité E_{dyn} , pour les 4 planches de chaque clone. Les courbes de la **Figure 3-8** présentent les différents profils diamétraux des variations de l'infradensité et du module d'élasticité E_{dyn} mesurés sur les 8 planches.

Cette figure montre des variations diamétrales de ID assez homogènes pour les 4 planche du clones IRCA825 (**Figure 3-8a**). Les variations diamétrales du module d'élasticité E_{dyn} chez le clone IRCA825 (**Figure 3-8c**), ainsi que les variations diamétrales de ID (**Figure 3-8b**) et du module d'élasticité E_{dyn} (**Figure 3-8d**) chez le clone IRCA41 semblent beaucoup moins homogènes entre les différentes planches.

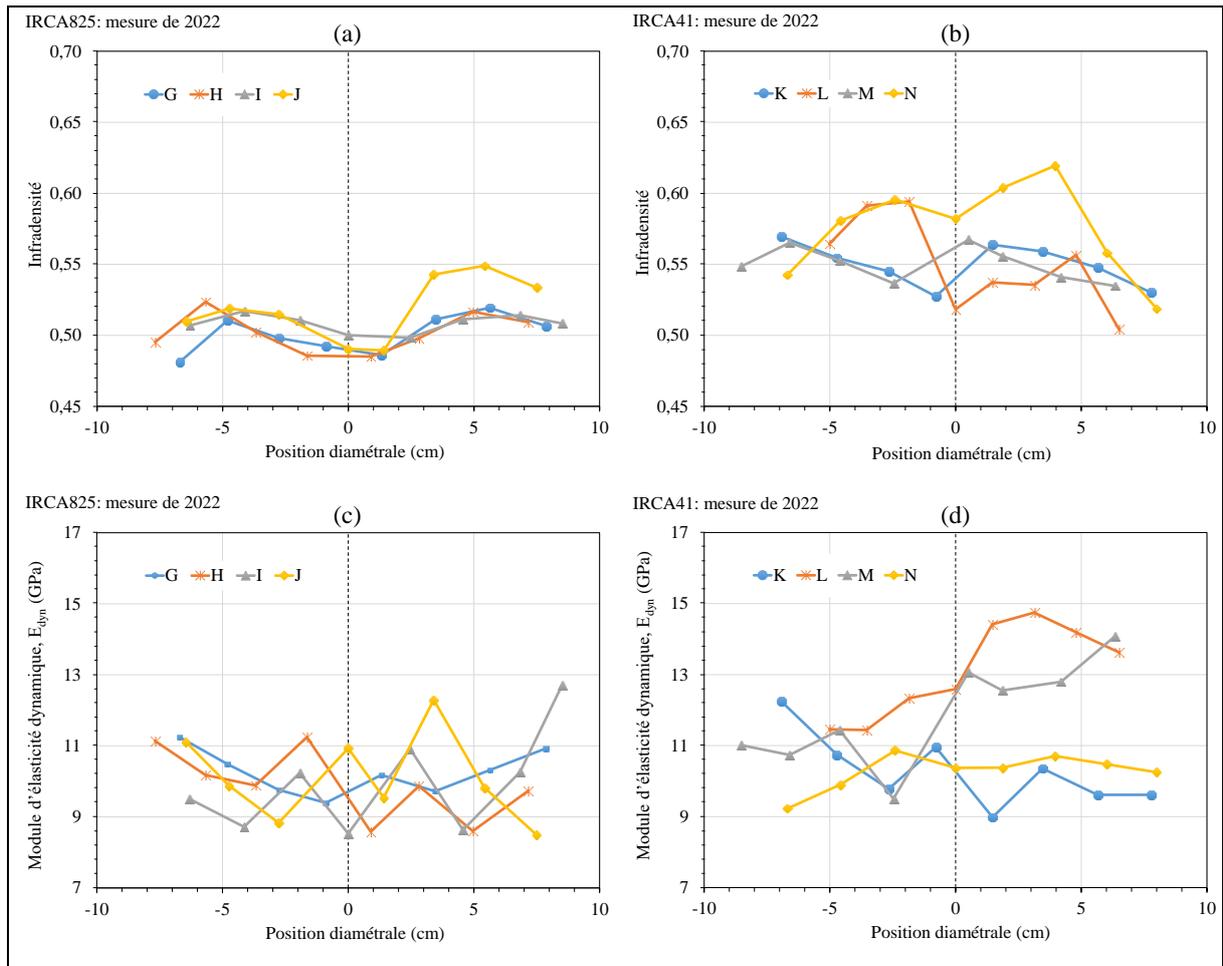


Figure 3-8: Profils des variations diamétrales de propriétés du bois. Variations diamétrales de l'infradensité sur les planches du clone IRCA825 (a) et du clone IRCA41 (b). Variations diamétrales du module d'élasticité dynamique (E_{dyn}) sur les planches du clone IRCA825 (c) et du clone IRCA41 (d). La ligne verticale en pointillé représente la position de la moelle.

Pour mieux comprendre et visualiser les variations radiales de propriétés du bois, nous avons déterminé un profil radial moyen pour chaque clone à partir de la moyenne de 8 rayons issus des 4 diamètres (voir §3.3.3). Les courbes de la **Figure 3-9** présentent les profils moyens des variations radiales de ID, du module d'élasticité E_{dyn} et du rapport E_{dyn}/ID des clones IRCA825 et IRCA41.

Sur la **Figure 3-9a**, on peut voir que le profil moyen des variations radiales de l'infradensité chez le clone IRCA825 a une allure croissante (pente de régression positive) de la moelle vers l'écorce. Elle varie en moyenne de $0,49 \pm 0,01$ près de la moelle à $0,51 \pm 0,01$ près de l'écorce, avec un maximum de $0,52 \pm 0,01$ près de l'écorce. Chez le clone IRCA41 en revanche, on observe une allure décroissante (pente de régression négative) du profil moyen des variations radiales de l'infradensité de la moelle vers l'écorce. On observe alors une baisse de l'infradensité moyenne de $0,56 \pm 0,03$ près de la moelle à $0,54 \pm 0,02$ près de l'écorce, avec un maximum de $0,57 \pm 0,03$ près de la moelle. Les observations faites sur l'allure des profils moyens des variations radiales d'infradensité peuvent être étendues aux profils moyens des variations radiales du module d'élasticité E_{dyn} chez les deux clones. En effet, la **Figure 3-9b** montre que le profil des variations radiales du module d'élasticité E_{dyn} a également une allure croissante (pente de régression positive) de la moelle à l'écorce chez le clone IRCA825. Le module d'élasticité E_{dyn} moyen passe de $9,83 \pm 1,0$ GPa près de la moelle à $10,7 \pm 1,2$ GPa près de l'écorce. Le clone IRCA41 a lui un profil décroissant (pente de régression négative) de la

moelle vers l'écorce, avec un module d'élasticité moyen passant de $11,7 \pm 1,7$ GPa près de la moelle à $11,0 \pm 1,5$ GPa près de l'écorce.

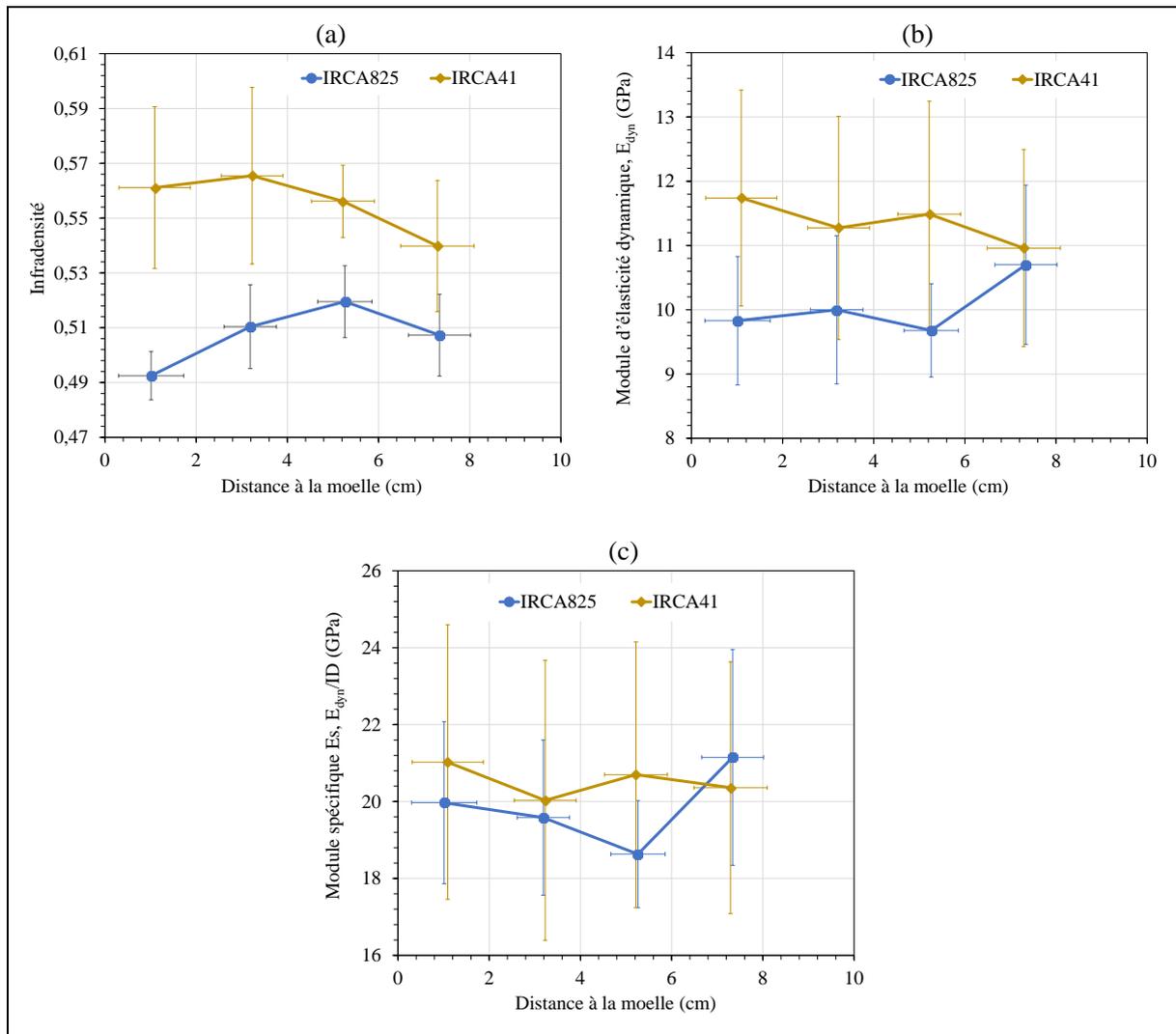


Figure 3-9: Profils moyens des variations radiales de propriétés mesurées sur des planches de bois des clones IRCA825 et IRCA41. **a.** Variations radiales de l'infradensité. **b.** Variations radiales du module d'élasticité dynamique E_{dyn} . **c.** Variations radiales du rapport E_{dyn}/ID . Les barres verticales et horizontales sur chaque courbe correspondent aux écart-types.

A la différence des profils moyens des variations radiales de l'infradensité et du module d'élasticité E_{dyn} , l'allure du profil moyen des variations radiales du rapport E_{dyn}/ID est moins marquée chez les deux clones (**Figure 3-9c**). Mais si on regarde également le signe de la pente de la droite de régression, on note que l'allure du profil est croissant pour IRCA825 et décroissant pour le IRCA41 (de la moelle à l'écorce).

Il est important de noter que les courbes de la **Figure 3-9** montrent une grande dispersion des valeurs chez le clone IRCA41 comparativement au clone IRCA825 pour lequel les écart-types sont plus faibles. Cette dispersion des valeurs pour IRCA41 tend à indiquer qu'on a une variabilité inter arbre plus importante chez le IRCA41 par rapport au IRCA825.

3.4.2 Résultats des mesures destructives de propriétés mécaniques sur les barreaux de bois

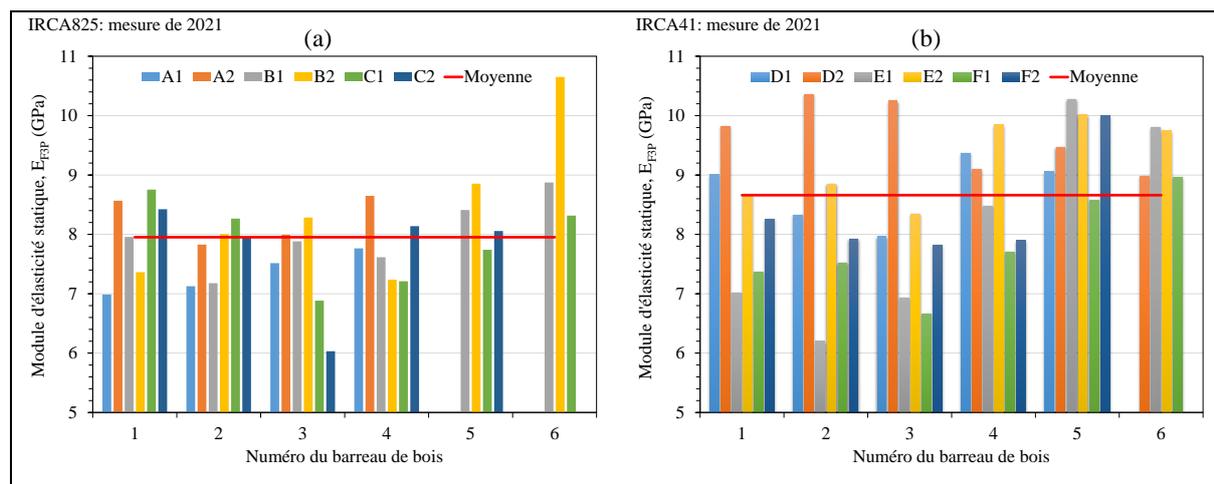
La caractérisation des barreaux de bois par des essais destructifs nous a permis d'obtenir pour chaque barreau le module d'élasticité en flexion 3 (E_{F3P}) ou en flexion 4 points (E_{F4P}) d'une part, le module de rupture (MOR) d'autre part.

3.4.2.1 Résultats sur la caractérisation destructive des barreaux de 2021

Tout comme les mesures non-destructives de 2021, les mesures de propriétés mécaniques en flexion 3 points de 2021 ne permettent pas d'avoir un profil des variations en fonction de la position à la moelle. Aussi, les graphiques de la **Figure 3-10** présentent la distribution des valeurs du module d'élasticité E_{F3P} et du module de rupture des différents barreaux pour les deux clones. Chez le clone IRCA825, cette figure montre que le barreau B26 a une valeur de module d'élasticité E_{F3P} (10,7 GPa) très au-dessus de la moyenne de l'ensemble qui est de $8,0 \pm 0,8$ GPa environ. Le barreau C23 a quant à lui la valeur de module la plus faible en-dessous de la moyenne, soit 6,0 GPa (**Figure 3-10a**). Sur la **Figure 3-10c**, on peut voir que le barreau B26 a également un module de rupture (83,2 MPa) très au-dessus de la moyenne qui est de $58,5 \pm 7,4$ MPa. Tandis que sur le barreau B12 on relève le module de rupture le plus bas en-dessous de la moyenne, soit 42,8 MPa.

En ce qui concerne le clone IRCA41, la **Figure 3-10b** montre que le barreau D22 a le module d'élasticité E_{F3P} (10,4 GPa) le plus fort, au-dessus de la moyenne qui est de $8,7 \pm 1,1$ GPa environ. Alors que sur le barreau E12, on a mesuré le module d'élasticité E_{F3P} (6,2 GPa) le plus faible, en-dessous de la moyenne. En ce qui le module de rupture, le barreau D23 présente la valeur la plus élevée (86,6 MPa) au-dessus de la moyenne qui est de $67,7 \pm 12,7$ MPa. Alors que le module de rupture le plus faible (en-dessous de la moyenne) a été mesuré sur le barreau E12, qui a également le module le plus faible (**Figure 3-10d**).

A l'image des différences entre les valeurs moyennes de ID et de module d'élasticité E_{dyn} , la **Figure 3-10** montre également des différences marquées de module d'élasticité E_{F3P} et de MOR du bois entre les deux clones ; ces différences étant toujours en faveur du clone IRCA41. Ce qui confirme d'ors et déjà les premières observations faites dans le chapitre précédent, notamment sur les différences de propriétés du bois.



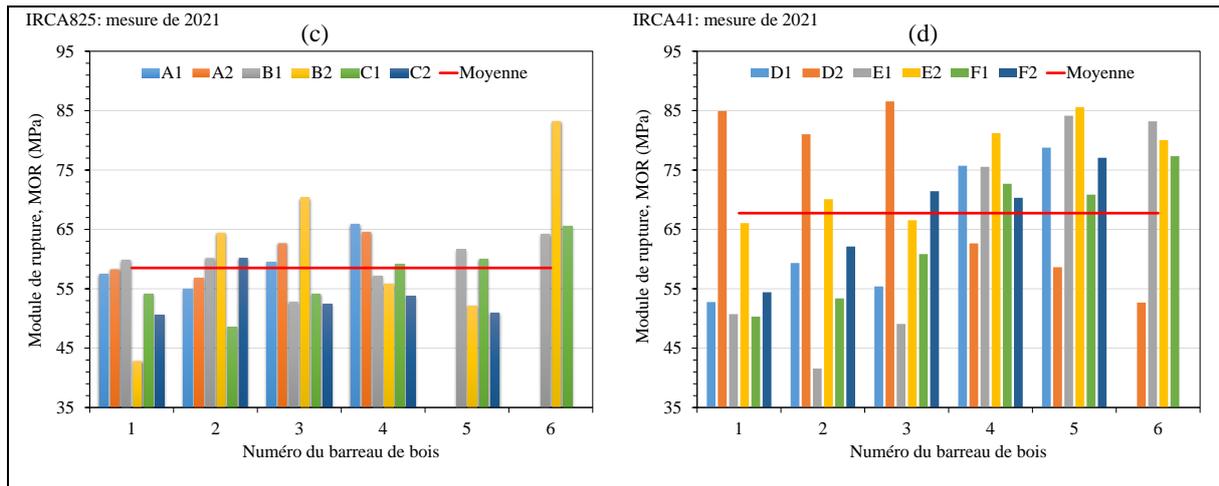


Figure 3-10: Distribution des valeurs de module d'élasticité statique en flexion 3 points (E_{F3P}) mesuré sur les barreaux issus du lot de planches (A1, A2, B1, B2, C1, C2) du clones IRCA825 (a) et du lot de planches (D1, D2, E1, E2, F1, F2) du clone IRCA41 (b). Distribution des valeurs de modules de rupture (MOR) mesurés sur les barreaux issus du lot de planches (A1, A2, B1, B2, C1, C2) du clone IRCA825 (c) et du lot de planches (D1, D2, E1, E2, F1, F2) du clone IRCA41 (d). La barre horizontale correspond à la moyenne de l'ensemble des barreaux du clone considéré.

Pour des raisons similaires à celles évoquées au paragraphe §3.4.1, il est également difficile de comparer les barreaux de même numéro pour les différentes planche de chaque clone. De même, seule la comparaison des planches prélevées à deux hauteurs différentes sur un même arbre reste possible ('planche 1', prélevée entre la base et 1 m et 'planche 2', prélevée entre 1 et 1,7 m). Le **Tableau 3-IV** présente les valeurs moyennes du module d'élasticité E_{F3P} et du module de rupture, pour les planches prélevées à des hauteurs différentes. Pour le clone IRCA825, ce tableau montre que la différence de module d'élasticité E_{F3P} moyen entre les planches du bas et du haut est de 5% ; tandis que la différence de module de rupture entre ces derniers est de 0,3%. Cependant, les tests de comparaisons bilatérales effectués montrent que ces différences ne sont pas significatives ; les p-values étant respectivement égales à 0,233 et 0,953.

Les observations sont un peu différentes pour le clone IRCA41. En effet le **Tableau 3-IV** montre pour ce clone, une différence de 12% entre les modules d'élasticité E_{F3P} moyens des planches du bas de l'arbre et celles du haut. D'après le test de comparaison bilatérale, cette différence est significative ($p=0,009$). En revanche, la différence de 11% entre le module de rupture moyen des planches de type 1 et 2 ne semble pas significative ($p=0,078$).

Tableau 3-IV: Valeur moyenne du module d'élasticité dynamique (E_{F3P}), du module de rupture (MOR) et du rapport E_{F3P}/ID , pour tous les barreaux issus des planches prélevées à la même hauteur. 'Planche 1', prélevée entre la base du tronc et 1 m de hauteur et 'Planche 2', prélevée entre 1 et 1,7 m de hauteur. Les moyennes sont données avec \pm un écart-type. S : différence significative, NS : différence non-significative.

Clone	Echantillon	Module d'élasticité, E_{F3P} (GPa)	Module de rupture, MOR (MPa)	Rapport E_{F3P}/ID (GPa)
IRCA825	Planche 1	$7,8 \pm 0,6$	$58,4 \pm 4,7$	$14,7 \pm 4,1$
	Planche 2	$8,1 \pm 1,0$	$58,6 \pm 9,7$	$16,6 \pm 1,7$
	p-value et niveau de signification	$p=0,233$ NS	$p=0,953$ NS	$0,067$ NS
IRCA41	Planche 1	$8,2 \pm 1,2$	$64,2 \pm 13,7$	$14,3 \pm 2,1$
	Planche 2	$9,1 \pm 0,9$	$71,3 \pm 11,0$	$16,4 \pm 1,5$
	p-value et niveau de signification	$p=0,009$ S	$p=0,078$ NS	$p=0,003$ S

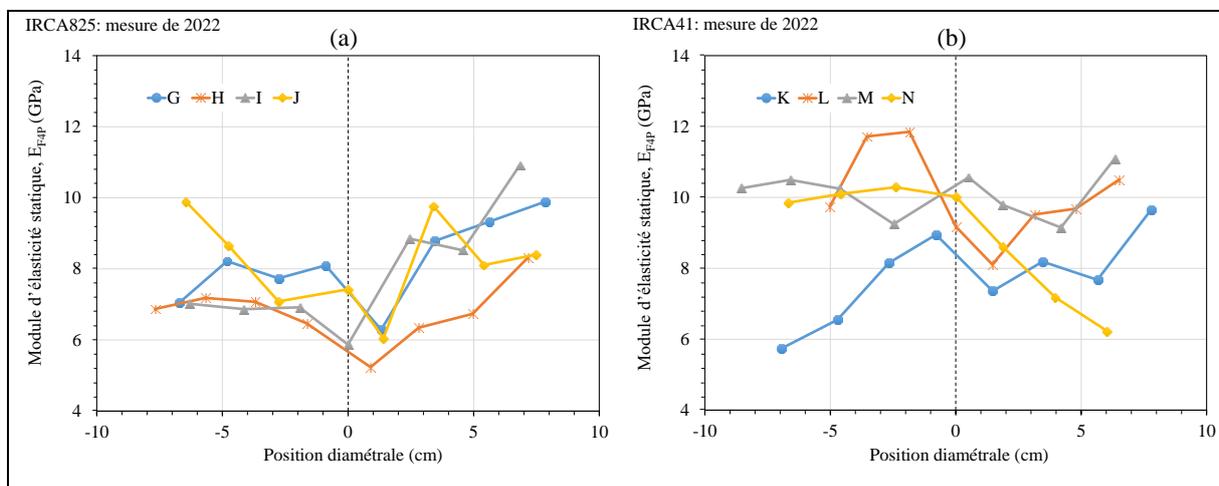
Une évaluation du rapport E_{F3P}/ID a également été effectuée (**Tableau 3-IV**). Chez le clone IRCA825, ce rapport varie en moyenne de $14,7 \pm 4,1$ GPa à $16,6 \pm 1,7$ GPa entre les planches du bas et celle du haut de la tige ; différence de 6%, non significative d'après le test de comparaison bilatérale ($p=0,067$). En revanche, on a une différence significative ($p=0,003$) du rapport E_{F3P}/ID chez le clone IRCA41. Les valeurs moyennes de ce rapport sont de $14,3 \pm 2,1$ GPa et de $16,4 \pm 1,5$ GPa, respectivement pour les planches du bas et celles du haut.

Il faut noter ici que le rapport E_{F3P}/ID est plus faible que le rapport E_{dyn}/ID , comme le montre les tableaux **Tableau 3-III** et **Tableau 3-IV**. Le module d'élasticité en flexion 3 points E_{F3P} est donc plus faible que le module d'élasticité dynamique E_{dyn} , ce qui est un résultat attendu du fait de l'augmentation de la rigidité avec la fréquence de sollicitation (Brancheriau, 2013) et de la non prise en compte du cisaillement dans l'analyse de la flexion 3 points.

3.4.2.2 Résultats sur la caractérisation destructive (rupture) des barreaux de 2022

Après les essais de caractérisation non-destructifs de 2022 présentés au paragraphe §3.4.1.2, tous les barreaux ont par la suite été testés en flexion 4 points jusqu'à la rupture. A l'image des mesures non-destructives de 2022, nous avons pu constituer des profils des variations du module d'élasticité E_{F4P} et du module de rupture (MOR). Les courbes de la **Figure 3-11** présentent les profils des variations diamétrales du module d'élasticité E_{F4P} et du module de rupture pour les différentes planches (planches G, H, I, J, K, L, M et N).

Chez le clone IRCA825, la **Figure 3-11a** et la **Figure 3-11c** présentent des variations diamétrales de module d'élasticité E_{F4P} et de MOR assez similaires pour les 4 planches. Chez le clone IRCA41 en revanche, les planches K, L et M présentent quasiment les mêmes variations diamétrales de module d'élasticité E_{F4P} (**Figure 3-11b**) et les planches L, M et N présentent des variations diamétrales de MOR similaire (**Figure 3-11d**).



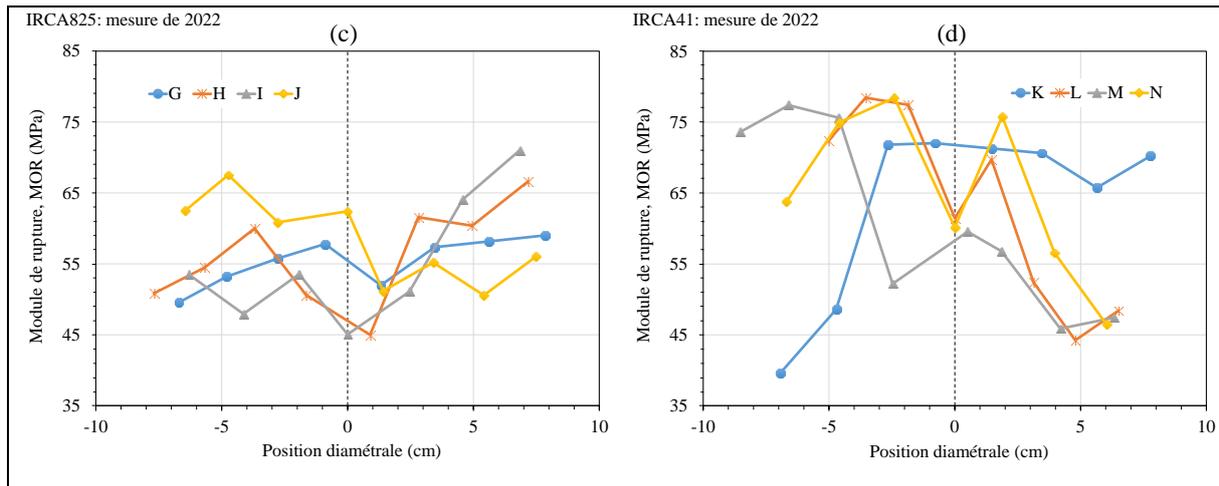


Figure 3-11: Profils des variations diamétrales de propriétés du bois. Variations diamétrales du module d'élasticité statique en flexion 4 points (E_{F4P}) sur les planches du clone IRCA825 (a) et du clone IRCA41 (b). Variations diamétrales du module de rupture (MOR) sur les planches du clone IRCA825 (c) et du clone IRCA41 (d). La ligne verticale en pointillé représente la position de la moelle.

Comme pour les essais non-destructifs (méthode BING), nous avons déterminé un profil moyen des variations radiales du module d'élasticité E_{F4P} et du module de rupture, d'une part. D'autre part, nous avons aussi construit un profil moyen des variations radiales du rapport E_{F4P}/ID . Ces profils moyens ont également été obtenus en faisant la moyenne des données des 8 rayons issus des 4 planches de chaque clone. Les graphiques de la **Figure 3-12** présentent les profils moyens des variations radiales du module d'élasticité E_{F4P} , du module de rupture et du rapport E_{F4P}/ID pour les deux clones.

La **Figure 3-12a** montre assez clairement que le profil moyen des variations radiales du module d'élasticité E_{F4P} a bien une allure croissante (pente de régression positive) de la moelle vers l'écorce, chez le clone IRCA825. Le module d'élasticité moyen passe de $6,5 \pm 0,9$ GPa près de la moelle à $8,8 \pm 1,5$ GPa près de l'écorce. Chez le clone IRCA41 en revanche, l'allure du profil est moins net. En effet, le module d'élasticité E_{F4P} moyen décroît d'abord de $9,4 \pm 1,4$ GPa près de la moelle à $8,9 \pm 1,8$ GPa vers l'écorce, avant de remonter à $9,4 \pm 1,8$ GPa au niveau du point le plus près de l'écorce (**Figure 3-12a**). Ces variations modérées expliquent la faible pente observée sur la courbe.

Sur la **Figure 3-12b**, on retrouve chez les deux clones les allures observées sur les **Figure 3-9a** et **Figure 3-9b**, à savoir : une croissance du module de rupture de la moelle vers l'écorce chez le clone IRCA825 et une décroissance chez le clone IRCA41. Pour le premier, le module de rupture varie de façon continue de $52,2 \pm 5,9$ MPa à $59,4 \pm 7,9$ de la moelle vers l'écorce. Quant au second, on observe une variation non monotone du module de rupture qui passe de $67,1 \pm 7,7$ MPa près de la moelle à $62,2 \pm 15,0$ MPa près de l'écorce, avec un minimum de $59,4 \pm 14,0$ MPa toujours près de l'écorce (**Figure 3-12b**).

L'allure des profils moyens des variations radiales du rapport E_{F4P}/ID chez les deux clones est assez similaire à celle observé sur les variations du module d'élasticité E_{F4P} . La **Figure 3-12c** montre assez clairement que le profil moyen des variations radiales du rapport E_{F4P}/ID évolue de façon croissante de la moelle vers l'écorce chez le clone IRCA825. Pour ce clone, le rapport E_{F4P}/ID varie de $13,3 \pm 1,8$ GPa près de la moelle à $17,3 \pm 2,8$ GPa près de l'écorce. Chez le clone IRCA41, on observe une variation non monotone du profil moyen du rapport E_{F4P}/ID de la moelle vers l'écorce. Ce rapport décroît d'abord de $16,7 \pm 2,2$ GPa à $16,0 \pm 3,4$ GPa, avant de croître de $16,0 \pm 3,4$ GPa à $17,4 \pm 3,7$ GPa. Ce qui donne une pente faible de la relation entre le rapport E_{F4P}/ID et la distance à la moelle. Mais cette dernière étant positive, on a une allure

faiblement croissante (et non linéaire) du profil moyen des variations du rapport E_{F4P}/ID chez le clone IRCA41 (Figure 3-12c).

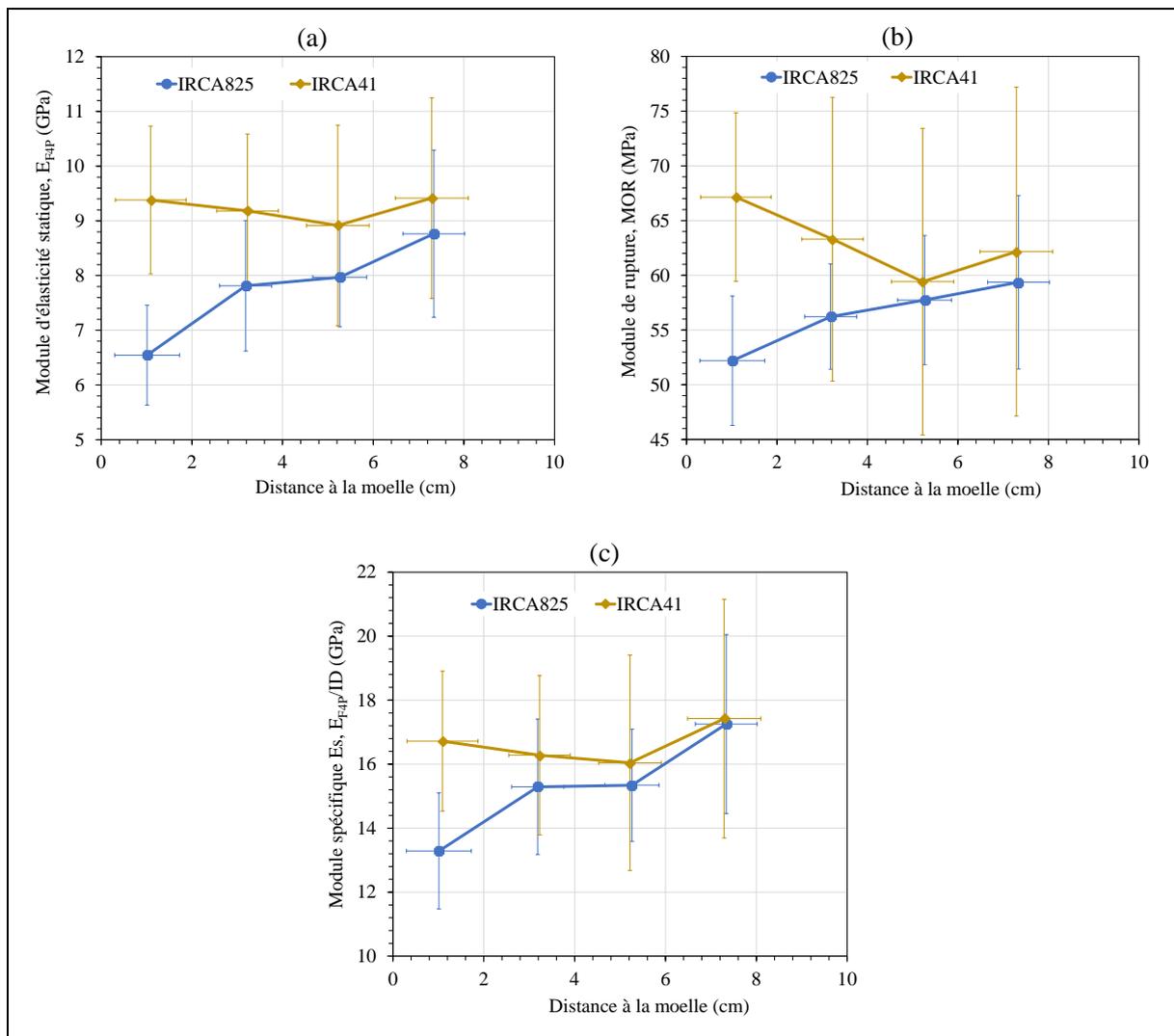


Figure 3-12: Profils moyens des variations radiales de propriétés physiques et mécaniques en fonction de la position dans l'arbre (éloignement à la moelle) mesurées sur des planches des clones IRCA825 et IRCA41. **a.** Variations radiales du module d'élasticité en flexion 4 points (E_{F4P}). **b.** Variations radiales du module de rupture. **c.** Variations radiales du rapport E_{F4P}/ID . Les barres verticales et horizontales sur chaque courbe correspondent aux écart-types.

Pour toutes ces caractéristiques physico-mécaniques, et quelle que soit la position du bois dans la section transverse, on observe que le clone IRCA825 montre des valeurs nettement plus faibles que IRCA41. Cette différence est particulièrement marquée proche de la moelle, zones de bois très juvénile formée durant les premières années de croissance des arbres. Ces résultats expérimentaux pourraient alors expliquer la différence de comportement des deux clones dans les premières années d'exploitation et en particulier la sensibilité plus forte de IRCA825 à la casse. Par contre, les tendances sur ces jeunes arbres semblent montrer que les propriétés de IRCA825 évoluent assez rapidement de façon positive et se rapprochent progressivement des valeurs de IRCA41. Cette tendance, qui mériterait d'être confirmée par la poursuite du suivi de ces arbres, invite à se poser la question de la date de mise en saignée, laquelle va profondément affecter les croissances secondaires des deux clones et potentiellement les propriétés du bois

formé. A priori, ceux-ci sont mis en saignée lorsqu'ils atteignent le même diamètre mais manifestement, IRCA825 aurait « besoin » d'une année supplémentaire de croissance non impactée pour trouver de paramètres mécaniques au niveau de IRCA41.

3.4.3 Résultats des mesures sur rondelles de bois

Les mesures de caractérisation effectuées sur les rondelles de bois ont permis d'obtenir la densité du bois (ρ_{12}) à l'échelle du cerne (ou microdensité) et l'angle de microfibrilles (AMF). Les profils des variations diamétrales de ces deux paramètres qui ont été construits pour chaque rondelle (3 rondelles par clone) sont présentés en annexe (voir **Annexe 2** et **Annexe 3**). Les graphiques de la **Figure 3-13** présentent les profils moyens des variations radiales de la microdensité et de l'AMF chez les clones IRCA825 et IRCA41.

La **Figure 3-13a** montre que pour les deux clones, l'allure du profil moyen des variations radiales de la microdensité est la même que celles de l'infradensité et du module d'élasticité observées précédemment (voir §3.4.1.2 et §3.4.2.2). Chez le clone IRCA825, l'évolution du profil est nettement croissance de la moelle vers l'écorce ; tandis qu'elle est stable, ou faiblement décroissante chez le clone IRCA41.

La **Figure 3-13b** montre que l'allure du profil moyen des variations radiales de l'AMF est très similaire chez les deux clones. On peut voir sur cette figure que l'AMF diminue fortement en partant de la moelle pour ensuite se stabiliser vers l'écorce. Cette observation est assez courante et en général analysée comme la présence de bois juvénile formé lors des premières années de croissance de la tige. Sans que cela n'ait jamais été démontré, de nombreux auteurs suggèrent que ce fort angle de microfibrilles aurait une fonction mécanique qui amène de la souplesse à la structure, permettant aux jeunes tiges élancées de pouvoir se déformer fortement sans dommage. On retrouve le même type de raisonnement pour l'angle du fil des fibres du bois juvénile comparé au bois normal, relation bien connue au sein des sciences du bois.

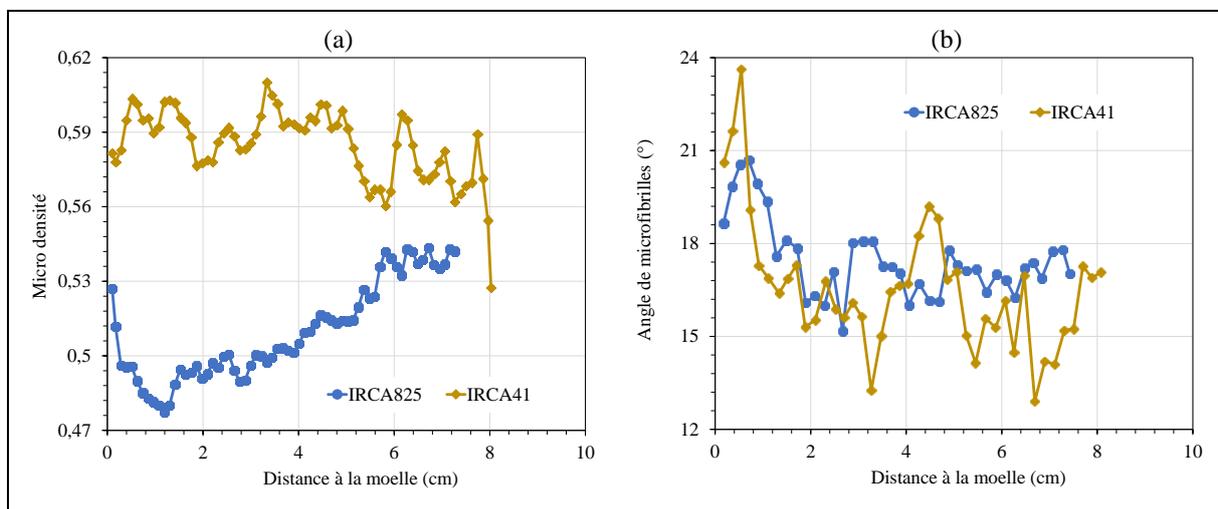


Figure 3-13: a. Profils moyens des variations radiales de microdensité chez les clones IRCA825 et IRCA41. b. Profils moyens des variations radiales de l'angle de microfibrilles chez les deux clones.

Ainsi, alors que l'AMF est très similaire chez les 2 clones, la densité reste stable et forte chez IRCA41 quand elle est bien plus faible pour IRCA825. Ces résultats sur la structure expliquent ici clairement pourquoi les propriétés mécaniques mesurées chez IRCA825 sont plus faibles que pour IRCA41. Toujours avec un AMF stable et similaire entre les 2 clones, la croissance continue de la densité de la moelle à l'écorce chez IRCA825 explique aussi la remontée très nette des propriétés mécaniques observées précédemment (**Figure 3-12**). C'est donc bien le

qui montre que le module d'élasticité dynamique est toujours supérieur aux deux modules statiques. De plus, le module d'élasticité dynamique est corrélé linéairement avec chacun des modules d'élasticité statiques en flexion 3 et 4 points ; les coefficients de corrélation étant respectivement de 0,67 et 0,58 (**Figure 3-15**). Ces observations sur la relation hiérarchique entre les modules d'élasticité dynamique et statique, et la relation linéaire entre ces deux paramètres sont en adéquation avec les observations reportées pas Ilic (2001) et Brancheriau (2013). Notons quand même que le rapport entre les modules d'élasticité dynamique et statique trouvé ici reste faible avec une valeur de 1,3 environ, contrairement à celui trouvé par Ilic (2001) chez l'Eucalyptus (*Eucalyptus delegatensis*), où le rapport entre les modules d'élasticité dynamique et statique était de 3,4.

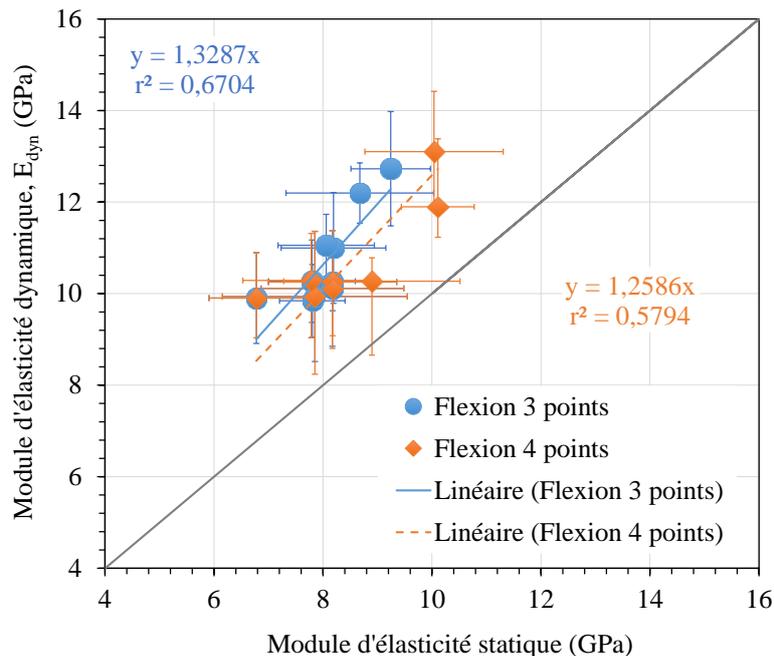


Figure 3-15: Relations entre le module d'élasticité dynamique moyen et les modules d'élasticité statiques moyen en flexion 3 points (campagne 2021) et flexion 4 points (campagne 2022). Les barres horizontales et verticales correspondent aux écart-types, et r^2 au coefficient de regression.

3.5 Discussion

3.5.1 Corrélation entre résistance et mesures non destructives

Les mesures non destructives par le BING ont l'avantage pratique d'être très simples et rapides à mettre en œuvre et de proposer un système facilement transportable. Nous avons voulu savoir si à partir des mesures de module d'élasticité dynamique des échantillons de bois, il était possible de prédire la résistance à la rupture de ces derniers. Une analyse de la relation entre le module d'élasticité dynamique de nos échantillons et leurs résistances à la rupture a donc été effectuée. La **Figure 3-16** présente l'évolution du module de rupture MOR en fonction du module d'élasticité E_{dyn} . Cette figure montre une corrélation linéaire moyenne entre ces deux paramètres mécaniques, avec $r^2 = 0,43$. Cela suggère que le module d'élasticité E_{dyn} est bien un indicateur de la résistance à la rupture des échantillons, mais avec une précision médiocre.

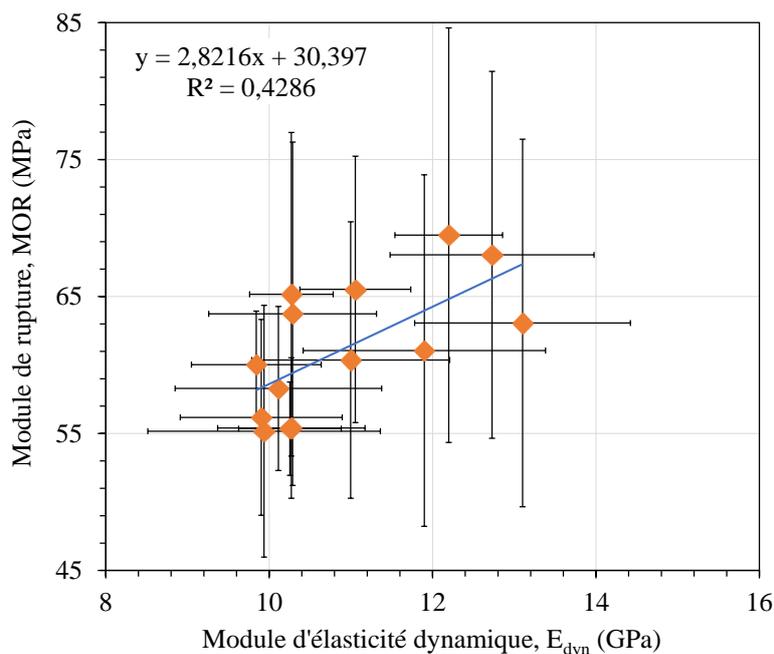


Figure 3-16: Relation entre module d'élasticité dynamique des échantillons de bois et leurs résistances à la rupture MOR. Les barres horizontales et verticales correspondent aux écart-types, et r^2 au coefficient de corrélation.

3.5.2 Cohérence entre les mesures mécaniques sur bois et sur arbre

Durant la phase expérimentale, nous avons eu à effectuer des mesures de propriétés mécaniques sur les arbres (essais *in-situ*) et sur des échantillons de bois (essais en laboratoire) issus de certains arbres testés. L'analyse des résultats de ces deux types d'essais permet de voir la cohérence entre les mesures sur l'arbre et les mesures sur échantillons de bois.

Les graphiques de la **Figure 3-17** présentent l'évolution du module d'élasticité statique (E) moyen mesuré sur l'arbre sur pied en fonction, d'une part du module d'élasticité (E_{dyn}) moyen mesuré sur bois, d'autre part des modules d'élasticité statiques E_{F3P} (campagne 2021) et E_{F4P} (campagne 2022) mesurés également sur bois. Sur la **Figure 3-17a**, on observe une certaine dispersion des valeurs près de la diagonale. Le module d'élasticité moyen mesuré sur l'arbre est donc du même ordre de grandeur que E_{dyn} mesuré sur bois. La même cohérence entre mesures mécaniques sur arbres et bois est également vérifiée sur **Figure 3-17b**, tout au moins pour les essais de 2022. Cependant, il est important de signaler que, sans que l'on puisse y apporter une explication rationnelle, le module d'élasticité mesuré sur les arbres en 2021 présente des valeurs très élevées comparativement aux mesures sur arbres en 2022, et sur échantillons de bois entre 2021 et 2022 ; ce qui avait déjà été remarqué au chapitre 2 (§2.3.1). Sur les graphiques de la **Figure 3-17b** ce constat se traduit d'une part, par une différence importante (environ 66%) entre les mesures sur arbre et sur échantillons de bois de 2021 ; alors qu'en 2022 la différence n'est que de 11%. D'autre part, il se traduit par un module d'élasticité dynamique plus faible que le module d'élasticité statique mesuré sur l'arbre ($E_{dyn} < E$). Or d'après les résultats précédents et les travaux de Brancheriau (2013), on sait que le module dynamique est en général plus fort que le module statique. Toutes ces observations conduisent à affirmer que le module d'élasticité mesuré sur arbres sur pied a été surestimé en 2021.

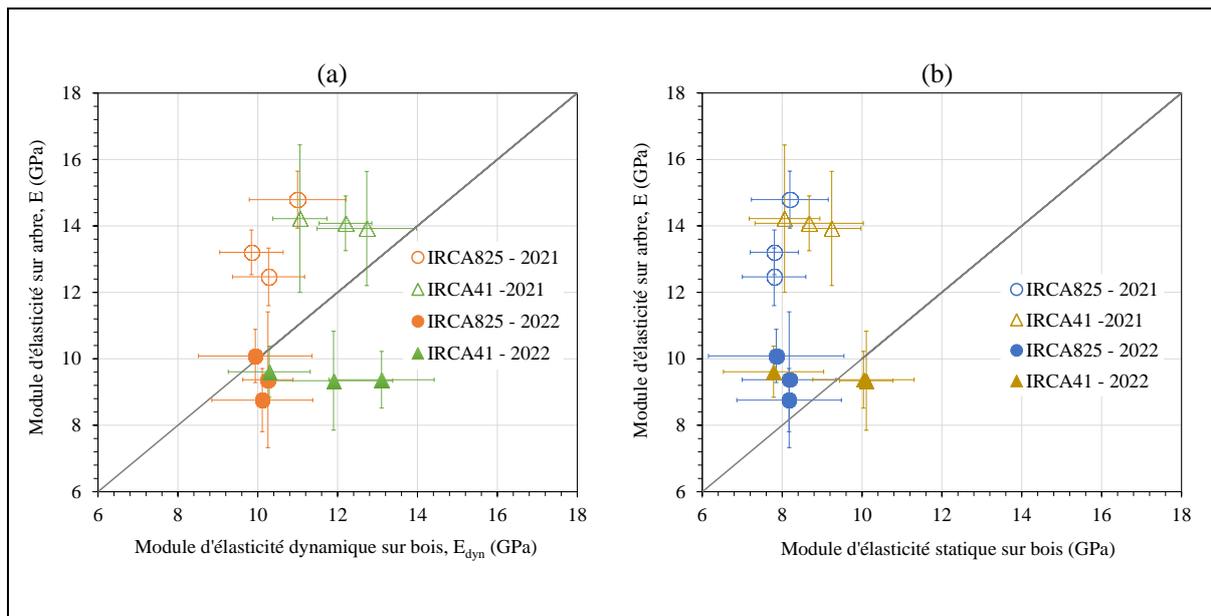


Figure 3-17: Relations entre les mesures mécaniques sur l'arbre sur pied et sur des échantillons de bois vert récoltés après abattage. **a.** Evolution du module d'élasticité E mesuré sur l'arbre sur pied et le module d'élasticité dynamique E_{dyn} mesuré sur échantillon (méthode BING) **b.** Evolution du module d'élasticité (mesure arbre sur pied) en fonction du module d'élasticité statique E_{F3P} et E_{F4P} mesuré sur échantillons prélevés après abattage. Les barres horizontales et verticales correspondent aux écarts-types.

La **Figure 3-18** présente l'évolution de la résistance du bois (σ_r) mesurée sur l'arbre sur pied (au niveau de la zone de rupture) en fonction de la résistance du bois mesurée sur des échantillons de bois prélevés après abattage. On retrouve bien ici le résultat du module de rupture du bois d'IRCA41 plus fort que IRCA825. On peut aussi observer que le module de rupture mesuré sur les six arbres présentés ici est relativement peu différent (4% de différence) de celui mesuré sur des échantillons de bois vert de ces mêmes arbres. Ce qui se traduit par des valeurs très proches de la diagonale passant par l'origine. De plus cette figure montre que le module de rupture sur l'arbre est globalement plus élevé que celui sur les échantillons de bois. Ce dernier constat s'explique par la présence d'hétérogénéité du bois, telles que des nœuds et autres défauts conduisant à dévier le fil, qui ont pour effet de diminuer la résistance à la rupture quand elle est mesurée sur du bois (Thibaut et al., 1997).

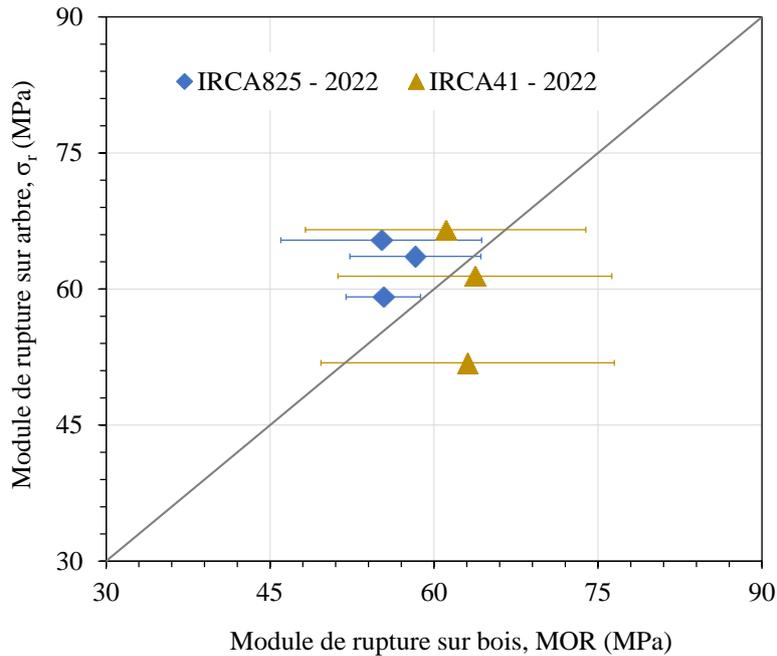


Figure 3-18: Relation entre la résistance du bois vert mesurée sur l'arbre sur pied et la résistance mesurée sur des échantillons de bois vert prélevés après abattage. Les barres horizontales correspondent aux écart-types.

3.5.3 Relations entre paramètres physiques et propriétés mécaniques

Nous avons vu au chapitre introductif (voir §1.1.4.2) que la densité et l'AMF sont des paramètres structuraux qui influencent fortement le comportement mécanique du bois. Ces deux paramètres traduisent la variabilité du bois à des échelles différentes, celle du tissu (densité) et celle de la paroi cellulaire (AMF). Il est donc important d'analyser les relations entre ces paramètres physiques et les propriétés du bois mesurées ici.

La **Figure 3-19** présente les relations entre l'infradensité et les paramètres mécaniques mesurés sur les échantillons de bois, notamment : le module d'élasticité statique (E_{F3P} et E_{F4P}), le module d'élasticité dynamique (E_{dyn}) et le module de rupture. On observe sur la **Figure 3-19a** une faible corrélation positive entre l'infradensité et le module d'élasticité E_{F3P} (et respectivement E_{F4P}), le coefficient de corrélation étant de 0,45 (et respectivement 0,41). On observe également une faible corrélation positive ($r^2 = 0,36$) entre l'infradensité et le module d'élasticité dynamique E_{dyn} (**Figure 3-19b**). En revanche, la **Figure 3-19c** montre une corrélation linéaire positive entre l'infradensité et le module de rupture, avec $r^2 = 0,72$. On peut conclure d'après ces résultats que l'infradensité explique principalement les variations du module de rupture.

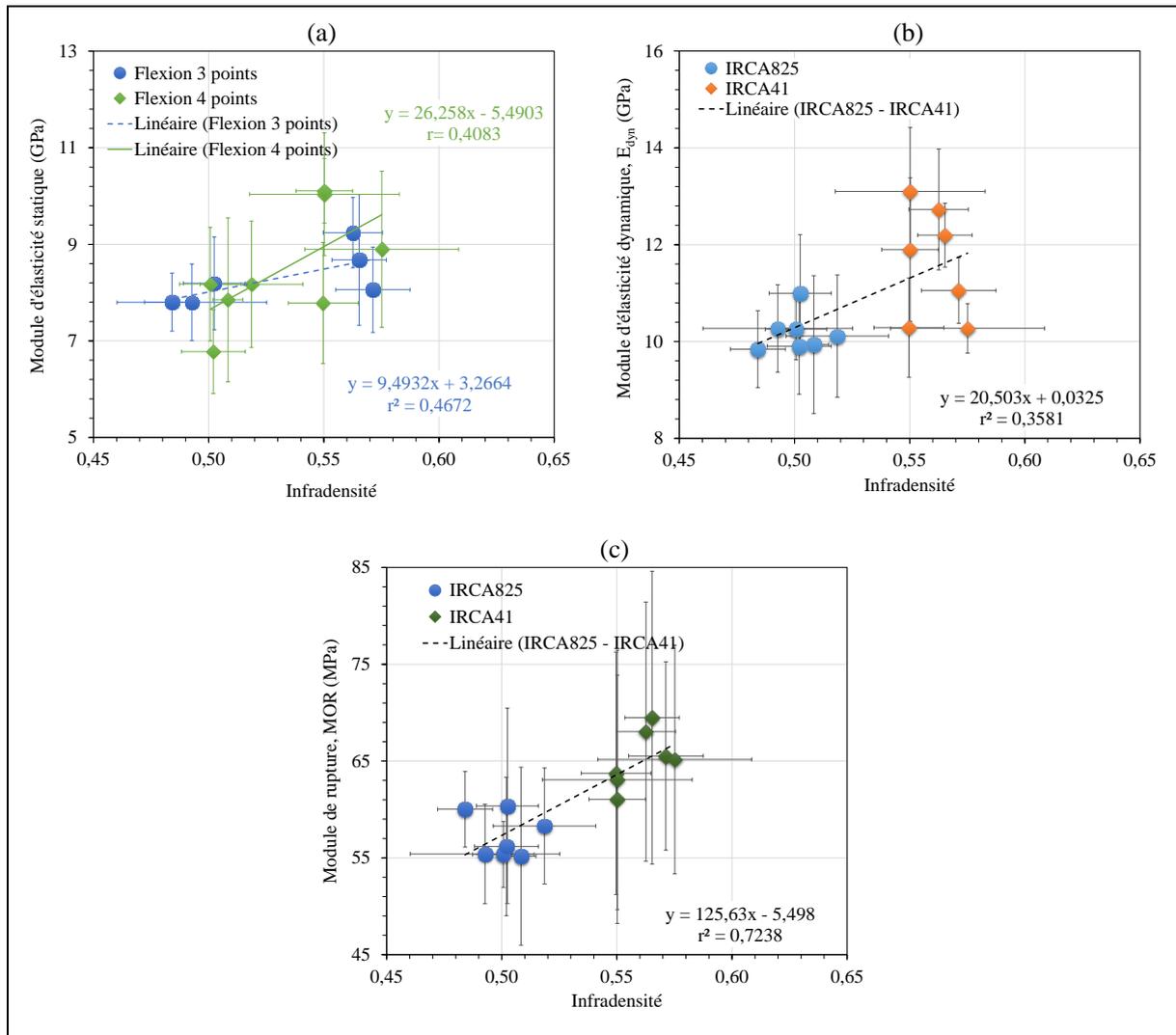


Figure 3-19: Relations entre les propriétés mécaniques des échantillons de bois prélevés après abattage et l'infradensité. **a.** Corrélation avec les modules d'élasticité statique en flexion 3 et 4 points. **b.** Corrélation avec le module d'élasticité dynamique. **c.** Corrélation avec le module de rupture. Les barres horizontales et verticales correspondent aux écart-types, et r^2 au coefficient de corrélation.

En ce qui concerne la relation entre la densité (ρ_{12}) à 12% d'humidité du bois (mesurée par microdensitométrie) et les paramètres mécaniques, les résultats sont plutôt conformes à la littérature (Guitard et El Amri, 1987; Haines et al., 1996; Yang et Evans, 2003). En effet, les graphiques de la **Figure 3-20** montrent globalement une très forte corrélation linéaire et positive entre la densité ρ_{12} et les modules d'élasticité statique E_{F3P} (**Figure 3-20a**) et dynamique E_{dyn} (**Figure 3-20b**). Les coefficients de corrélation pour ces deux relations sont respectivement de 0,92 et 0,88. De plus, la **Figure 3-20c** montre aussi une corrélation entre la densité ρ_{12} et le module de rupture, avec $r^2=0,72$. Ainsi, ces résultats confirment que la densité ρ_{12} , même seule, est déjà globalement un bon indicateur des paramètres mécaniques.

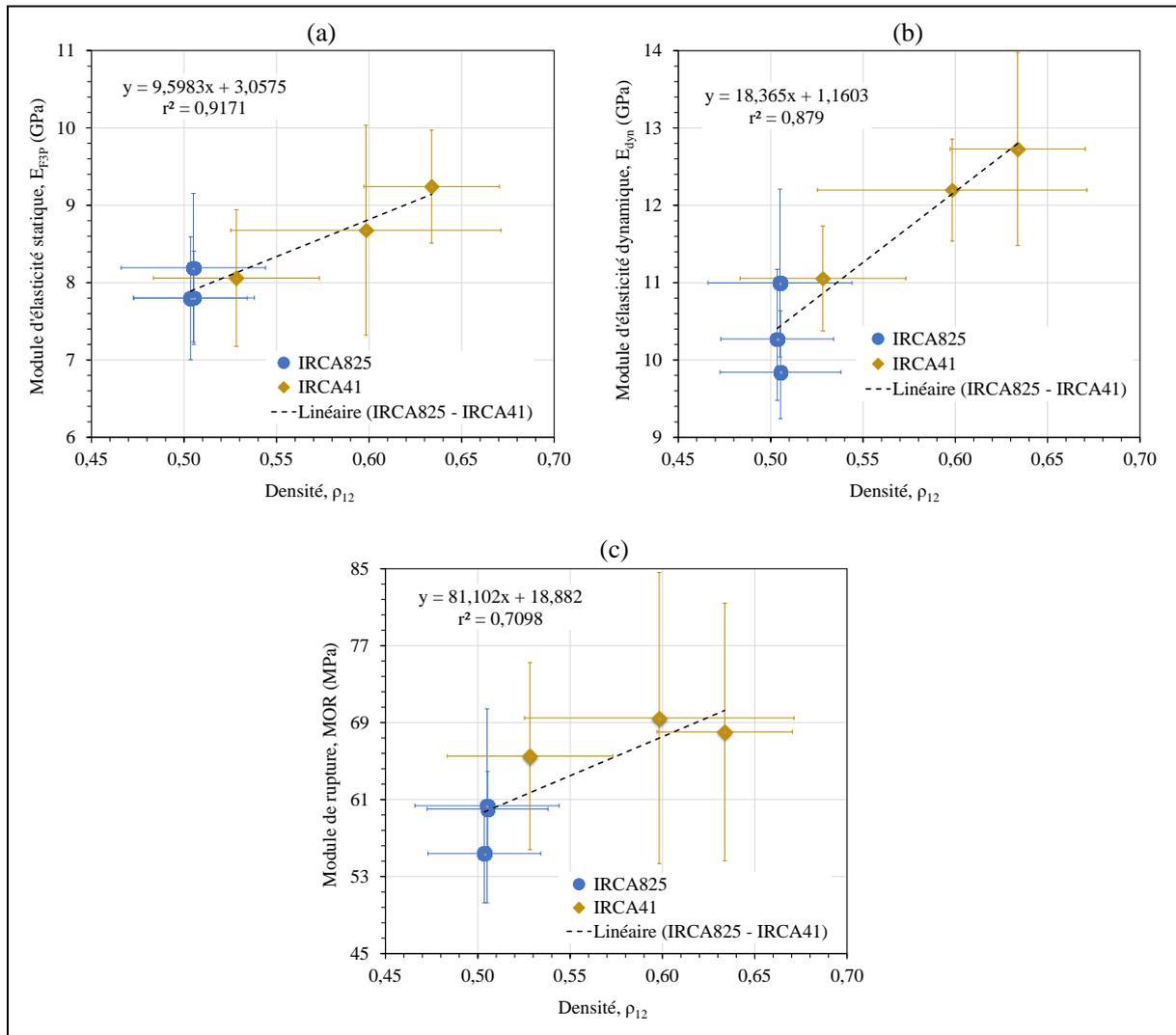


Figure 3-20: Relations entre les propriétés mécaniques des échantillons de bois et la densité à 12% d'humidité du bois (mesurée par microdensitométrie). **a.** Corrélation avec les modules d'élasticité statique en flexion 3 points. **b.** Corrélation avec le module d'élasticité dynamique. **c.** Corrélation avec le module de rupture. Les barres horizontales et verticales correspondent aux écarts-types, et r^2 au coefficient de corrélation.

En dehors des relations entre la densité (ou l'infradensité) et les propriétés mécaniques présentées ci-dessus, nous avons également examiné les liens entre l'AMF et les mêmes paramètres mécaniques. La **Figure 3-21** présente les relations entre l'AMF et les modules d'élasticité E_{F3P} (et respectivement E_{dyn}). Il apparaît sur cette figure que les modules d'élasticité E_{F3P} (**Figure 3-21a**) et E_{dyn} (**Figure 3-21b**) décroissent avec l'augmentation de l'AMF. Cette première observation est en accord d'une part avec les profils des variations des modules d'élasticité et de l'AMF (**Figure 3-12** et **Figure 3-13**). D'autre part, cette décroissance des modules d'élasticité est également en accord avec les résultats d'autres auteurs (Navi et al., 1995; Yamamoto and Kojima, 2002; Yang and Evans, 2003; Niez, 2018). On observe également sur les figures **Figure 3-21a** et **Figure 3-21b**, une faible corrélation linéaire entre l'AMF et les modules d'élasticité E_{F3P} et E_{dyn} , les coefficients de corrélation étant respectivement de 0,47 et 0,57. Ce qui signifie en d'autres termes que l'AMF seul n'est pas un bon prédicteur pour le module d'élasticité. Cette dernière remarque peut s'étendre à la relation entre l'AMF et le module de rupture, présenté sur la **Figure 3-21c**. Cette figure montre qu'il n'y a pas de corrélation linéaire ($r^2 = 0,14$) entre l'angle de microfibrilles et les paramètres de

rupture mesurés ici. Ce qui tend à confirmer que l'AMF n'est donc pas un bon indicateur du module de rupture.

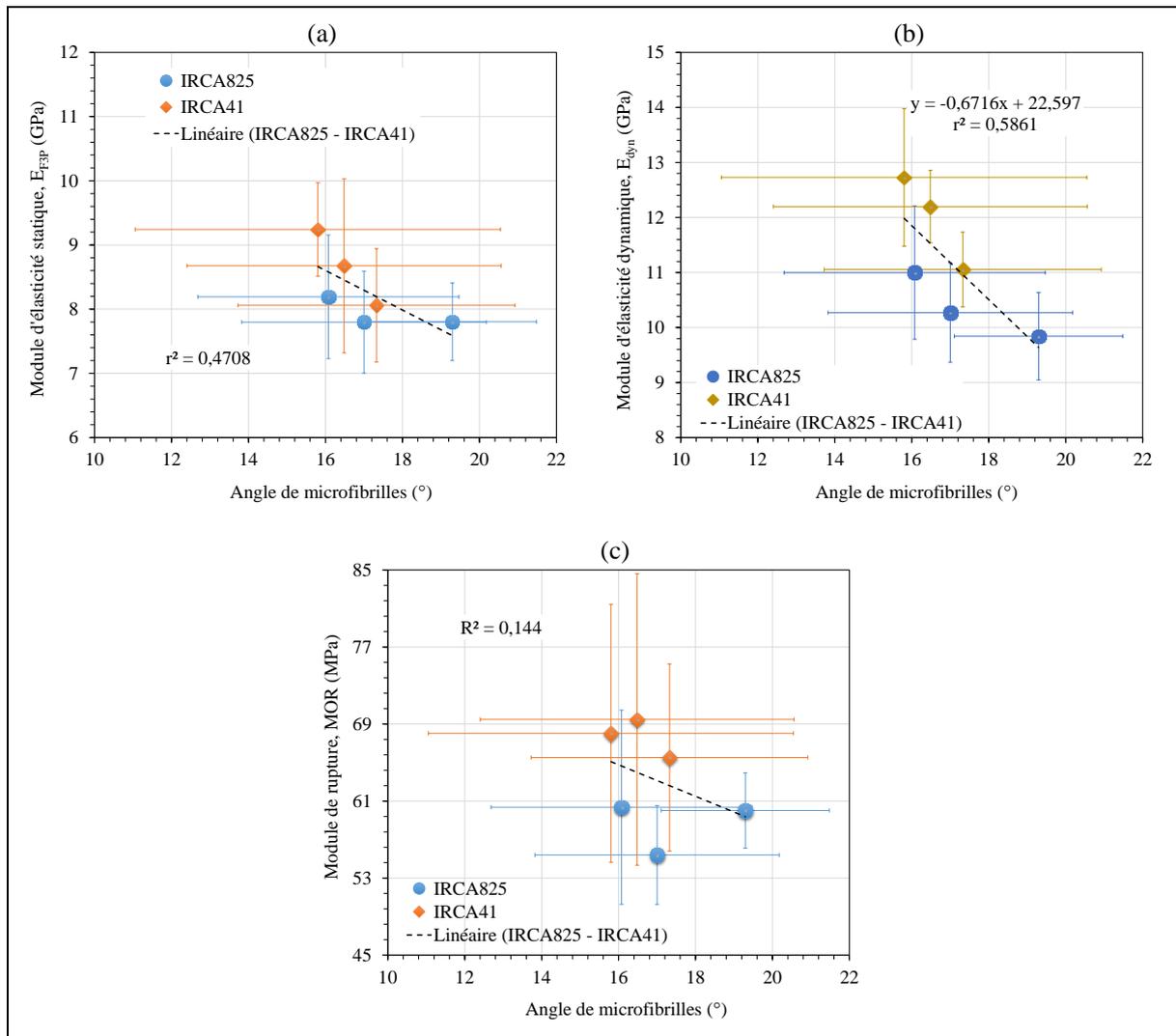


Figure 3-21: Relations entre les propriétés mécaniques des échantillons de bois et l'angle de microfibrilles. **a.** Corrélation avec les modules d'élasticité statique en flexion 3 points. **b.** Corrélation avec le module d'élasticité dynamique. **c.** Corrélation avec le module de rupture. Les barres horizontales et verticales correspondent aux écart-types, et r^2 au coefficient de corrélation.

En plus de l'angle de microfibrilles, le rapport entre le module d'élasticité et la densité est également un déterminant de la performance mécanique du bois (Salmén et Burgert, 2009). Exprimé en GPa, ce rapport est appelé module spécifique et il caractérise la rigidité de la paroi cellulaire. Comme on l'a vu sur les figures **Figure 3-9** et **Figure 3-12**, les profils moyens des variations du module spécifique ont la même allure que ceux du module d'élasticité et l'infradensité, à savoir : croissant de la moelle vers l'écorce pour le clone IRCA825 et décroissant pour le clone IRCA41. L'analyse des relations entre le module spécifique et les paramètres mécaniques conduit à la même observation que précédemment sur l'AMF ; à savoir qu'il n'y a pas de corrélation entre les paramètres. Autrement dit, le module spécifique n'est pas un bon indicateur pour les propriétés mécaniques mesurés ici.

Ainsi, d'après les relations de corrélation trouvées précédemment nous pouvons conclure que :

- L'infradensité explique 36 à 45% des variations du module d'élasticité et 72% des variations de module de rupture observées sur les échantillons des bois ;

- La densité (ρ_{12}) explique 88 à 92% des variations du module d'élasticité et 72% des variations de module de rupture ;
- L'AMF explique 47 à 57% des variations du module d'élasticité et seulement 10% des variations de module de rupture.

Ces résultats mettent en lumière sur nos deux clones d'hévéa que si la densité est connue pour être un marqueur fort des propriétés mécaniques, la connaissance de l'AMF permet, pour certaines essences, de renforcer les corrélations pour arriver à des niveaux de prédiction très élevés, comme cela a pu être reporté pour l'eucalyptus par Yang et Evans (2003).

3.5.4 Comparaison interclonale des propriétés du bois

Les résultats du chapitre précédent (voir §2.3.3.2 et §2.3.4.3) ont mis en évidence des différences importantes entre les clones IRCA41 et IRCA825, notamment au niveau des propriétés du bois. Pour consolider ces résultats, nous avons comparé les propriétés mécaniques mesurées des échantillons de bois des deux clones.

Le graphique en boîte à moustache de la **Figure 3-22a** présente la distribution de module d'élasticité E_{dyn} de tous les échantillons de bois des clones IRCA825 et IRCA41. On peut voir sur ce graphique que le module d'élasticité E_{dyn} est en moyenne de $10,2 \pm 1,1$ GPa chez le clone IRCA825. En revanche, chez le clone IRCA41 on a une valeur moyenne de $11,7 \pm 1,4$ GPa, d'où une différence de 14% ($p = 4,88 \times 10^{-10}$). L'analyse comparative des modules de rupture des deux clones présente elle aussi des différences similaires. En effet, la **Figure 3-22b** montre que le MOR moyen est de $57,4 \pm 6,8$ MPa chez le clone IRCA825 et de $65,6 \pm 12,6$ MPa chez le clone IRCA41, la différence étant de 14% ($p = 7,09 \times 10^{-6}$). Ces résultats montrent donc que le clone IRCA41 produit un bois qui est 14% plus rigide et plus résistant que celui produit par le clone IRCA825.

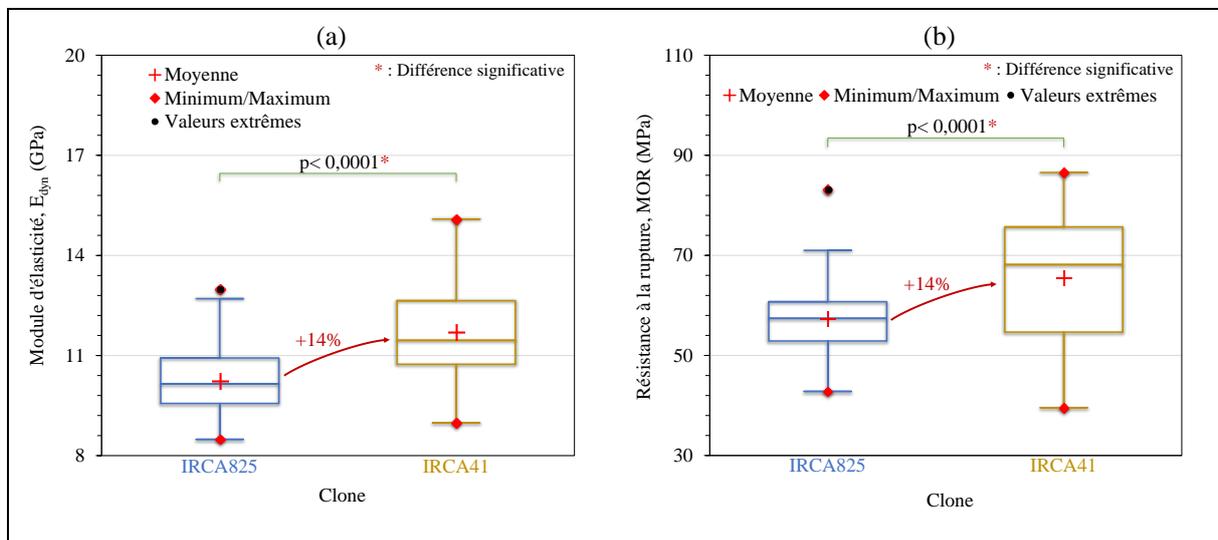


Figure 3-22: Comparaison interclonale des valeurs des modules d'élasticité dynamique E_{dyn} (a) et des modules de rupture (b), mesurés sur les échantillons de bois vert prélevés après abattage. (*) indique une différence significative du test de comparaison bilatéral avec p la p-value.

Les mêmes relations sont observées pour le module d'élasticité E_{F3P} (et E_{F4P}) qui est de $7,9 \pm 0,8$ GPa (respectivement $7,7 \pm 1,3$ GPa) chez le IRCA825 ; tandis que chez le IRCA41, sa valeur est de $8,7 \pm 1,1$ GPa (respectivement $9,2 \pm 1,5$ GPa) ; ce qui fait une différence de 9% (respectivement 19%) entre les deux clones.

Ces différences de propriétés mécaniques entre les deux clones peuvent s'expliquer par des différences structurelles entre ces clones. Les résultats précédents ont révélé que 88 à 92% des variations de module d'élasticité et 72% des variations de MOR du bois chez ces clones sont expliquées par la densité ρ_{12} et l'infradensité. Ainsi, nous avons examiné la différence interclonale des propriétés physiques mesurées sur les échantillons de bois (densité, AMF...).

La **Figure 3-23** présente la distribution des valeurs d'infradensité et de densité ρ_{12} mesurées sur les échantillons de bois de chaque clone. Il apparaît d'après cette figure que l'infradensité moyenne est de $0,50 \pm 0,02$ chez le clone IRCA825 et de $0,56 \pm 0,02$ chez le clone IRCA41 (**Figure 3-23a**). On a ainsi une différence interclonale de 12% significative ($p = 10^{-4}$). On retrouve à nouveaux ces différences en comparant les valeurs moyennes de densité ρ_{12} entre les deux clones (**Figure 3-23b**). Chez le clone IRCA825 elle est de $0,50 \pm 0,03$ et de $0,59 \pm 0,07$ chez le clones IRCA41, soit une différence interclonale de 17% ($p = 10^{-4}$). Autrement dit, le clone IRCA41 produit un bois 12 à 17% plus dense que celui produit par le clone IRC825.

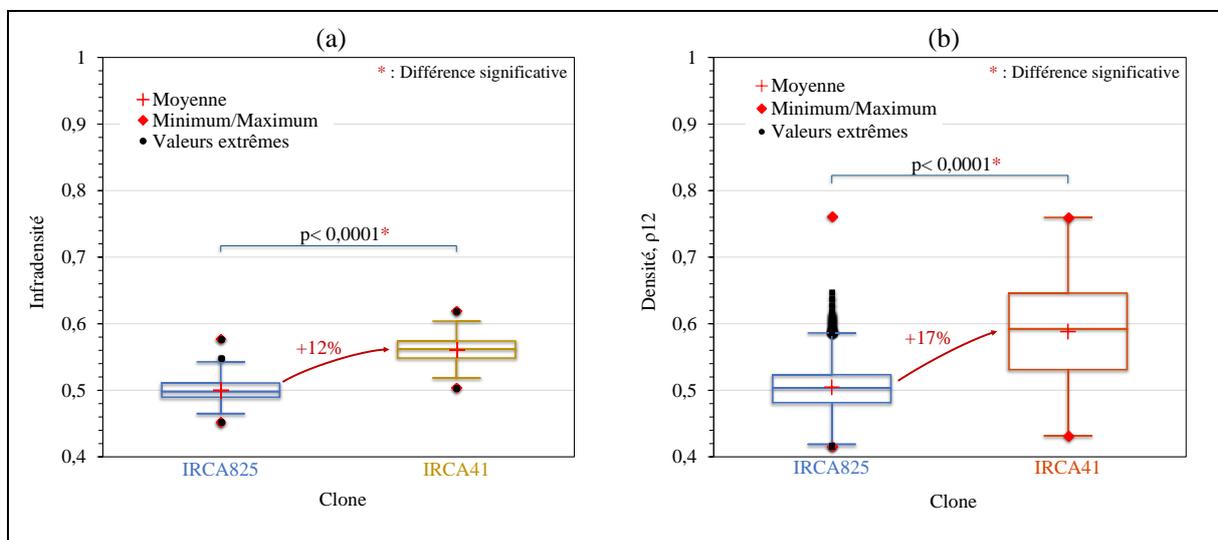


Figure 3-23: Comparaison interclonale des valeurs d'infradensité (a) et de densité à 12% d'humidité du bois (b), mesurées sur les échantillons de bois prélevés après abattage. (*) indique une différence significative du test de comparaison bilatéral avec p la p-value.

La comparaison interclonale de l'angle de microfibrilles montre elle aussi des résultats intéressants qui viennent appuyer ceux présentés précédemment. En effet, la **Figure 3-24a** indique que le clone IRCA825 montre un AMF moyen de $17,5 \pm 3,2^\circ$ alors que chez le clone IRCA41, l'AMF moyen est plutôt de $16,5 \pm 4,2^\circ$. Autrement dit, il n'y a pas de différence d'AMF entre les deux clones (différence interclonale de 6%, avec $p = 0,191$).

A côté des différences d'infradensité, de densité et d'AMF observées entre les deux clones, la comparaison interclonale du rapport E_{dyn}/ID ou module spécifique, ne montre quant à elle aucune différence. La **Figure 3-24b** montre que ce rapport est en moyenne de $20,5 \pm 2,3$ et $20,9 \pm 2,8$ GPa respectivement pour le IRCA825 et IRCA41. Ce qui fait une différence de 2%, non significative ($p = 0,354$). Ce résultat tend à montrer que la rigidité de la paroi cellulaire (caractérisée par le rapport E_{dyn}/ID) est la même chez les deux clones. Ce résultat est à mettre en regard de la mesure de l'AMF qui montre tout de même de grandes similitudes entre les 2 clones. De plus comme on peut s'y attendre, la **Figure 3-24c** montre une bonne corrélation entre l'AMF et le rapport E_{dyn}/ID chez les deux clones, avec $r^2 = 0,89$ et $0,98$ respectivement chez le IRCA825 et le IRCA41.

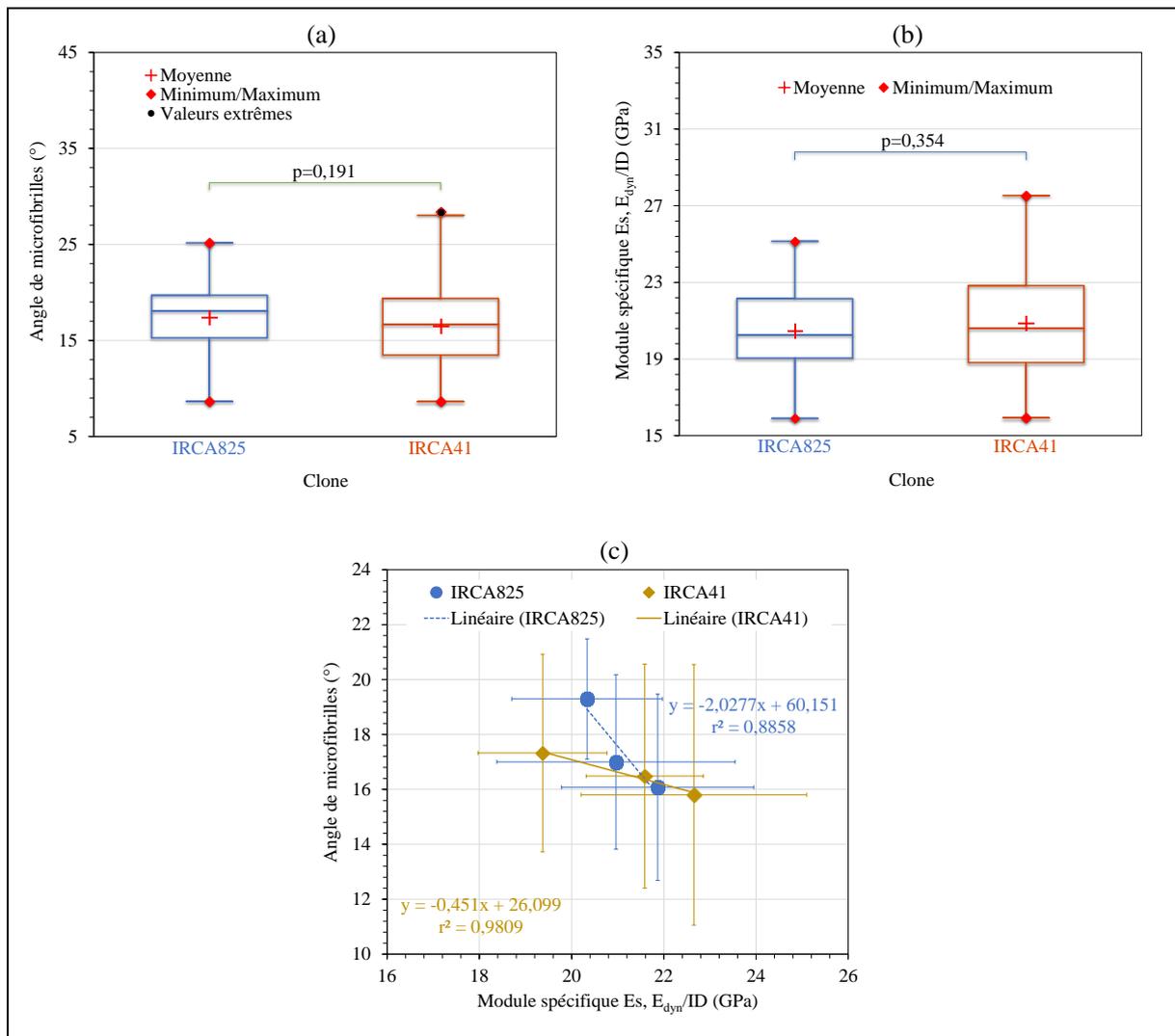


Figure 3-24: Comparaison interclonale des valeurs d'angles de microfibrilles (a) et du module spécifique (b), mesurées sur les échantillons de bois prélevés après abattage. p correspond à la p-value du test de comparaison bilatéral. c. Relation entre l'AMF et le module spécifique (rapport E_{dyn}/ID). Les barres horizontales et verticales correspondent aux écart-types, et r^2 au coefficient de corrélation.

3.6 Synthèse sur les différences de propriétés du bois entre les clones IRCA825 et IRCA41

L'analyse comparative des échantillons de bois des clones IRCA825 (sensible à la casse) et IRCA41 (résistant à la casse) a montré des différences significatives. Le comportement mécanique du bois vert chez le clone IRCA825 se caractérise par une rigidité plus faible comparativement au clone IRCA41. Il se caractérise en plus par une résistance du bois plus faible. Ces résultats confirment les premières observations faites au Chapitre 2 où il avait été montré que les arbres des deux clones ont la même rigidité de tige mais une résistance différente à cette flexion.

Au niveau structurel, l'analyse sur des échantillons des bois a montré des différences qui expliquent pourquoi le clone IRCA41 montre des propriétés mécaniques plus fortes. En effet, à l'échelle tissulaire, les résultats ont montré que le clone IRCA41 se distingue principalement du clone IRCA825 au niveau de la structure par une densité du bois significativement plus

élevée. A l'échelle pariétale, l'AMF est très similaire pour les 2 clones. Ce qui se traduit par une rigidité de la paroi cellulaire (caractérisée par le rapport entre le module d'élasticité et la densité du bois) similaire chez les deux clones. Nous pouvons donc dire, la forte rigidité et la forte résistance du bois du clones IRCA41 par rapport au clones IRCA825, est essentiellement lié à sa densité de bois plus élevé. Les profils radiaux des caractéristiques structurelles montrent cependant que si l'écart est très fort pendant les premières années de développement de la tige, celui-ci tend à se rétrécir et on ne peut pas exclure que IRCA 825 rattrape son retard, voire, que les courbes se croisent. Il serait pertinent pour cela de continuer à suivre ces plantations pendant quelques années et ré-échantillonner. Ceci peut être envisagé de façon non-destructive par carottage et mesure des profils de densité.

Chapitre 4: Acclimatation mécanique des clones d'hévéa IRCA825 et IRCA41

4.1 Introduction

Nous avons vu au Chapitre 1 (*voir* §1.3) que la réaction des arbres face au vent n'est pas qu'une réaction mécanique passive. Les arbres ne sont pas de simples mats portant une voile. Ils sont capables de réagir de manière active à des vents chroniques, en ajustant leur croissance (primaire et secondaire) pour mieux résister. Ce sont ces réactions de croissance suite à des stimulations mécaniques transitoires que l'on regroupe sous le terme « thigmomorphogenèse ». L'une des méthodes pour mettre en évidence ces phénomènes d'acclimatation thigmomorphogénétique est de recourir à des techniques de « haubanage » (Moore et al., 2014; Bonnesoeur et al., 2016; Dongmo et al., 2022).

Le haubanage en général est une forme de tuteurage très couramment utilisée par les arboriculteurs pour soutenir un tronc ou des branches ou pour leur permettre de se redresser ou simplement de maintenir leur port sans casser. Ce dispositif a été utilisé par les biomécaniciens pour limiter les mouvements dus au vent d'un arbre et mettre ainsi en évidence, et même quantifier, la croissance de l'arbre liée au processus d'acclimatation, c'est-à-dire à la perception des stimulations mécaniques. Dans notre travail, nous avons choisi d'associer un dispositif de haubanage (pour la mise en évidence de la mécano-perception) et des essais mécaniques sur pied afin de permettre de caractériser le bénéfice adaptatif dû aux processus d'acclimatation mécanique des arbres. L'objectif de cette expérimentation est d'évaluer, d'une part la capacité d'acclimatation de chacun des deux clones d'hévéa de plantation étudiés ici (le IRCA825 sensible et le IRCA41 résistant à la casse), d'autre part la variation interclonale de cette capacité d'acclimatation et son rôle dans la sensibilité à la casse au vent. Pour atteindre ces objectifs qui s'inscrivent dans l'axe 3 du projet « Vent-Debout hévéa I », nous avons mis en place un vaste dispositif de haubanage d'arbres sur des champs de clone de la SOGB (4°40'34.8''N, 7°05'31.3''O) en Côte d'Ivoire. Ce dispositif se compose de 20 paires d'arbres de chaque clone, réparties en 40 arbres haubanés et 40 arbres jumeaux témoins (non-haubané).

Dans la suite de ce chapitre, nous présenterons l'ensemble du dispositif expérimental ainsi que les premiers résultats obtenus après 18 mois de suivi de croissance des arbres.

4.2 Matériel et méthodes

Au cours de la première campagne expérimentale du 27 novembre 2020 au 03 mars 2021 qui nous a permis d'effectuer les premiers essais de flexion sur pied non destructif, nous avons également sélectionné les blocs et les arbres de cette nouvelle expérimentation, et mis en place le dispositif de haubanage. Les blocs sélectionnés pour cet essai sont les suivants (**Figure 4-1**) :

- **BR85** (pour le IRCA825) planté en 2016 (*voir* §2.2.1.1), mais contrairement aux essais de flexion les couples d'arbre (haubané vs témoin) ont été sélectionnés dans les parcelles 6, 7, 8 et 20 de ce bloc (**Figure 4-1b**);
- **SR11** (pour le IRCA41) dont la superficie totale est de 43 ha, situé dans la division de Singhel aux coordonnées (4°38'39.3''N, 7°06'59.8''O) et planté en 2015. Les couples d'arbres ont été sélectionnés dans les parcelles 20, 22 et 42 de ce bloc (**Figure 4-1c**).

Le choix de ces blocs est lié au fait qu'ils sont situés sur des terrains assez plats, ce qui évite que certains arbres soient plus exposés au vent que d'autre.

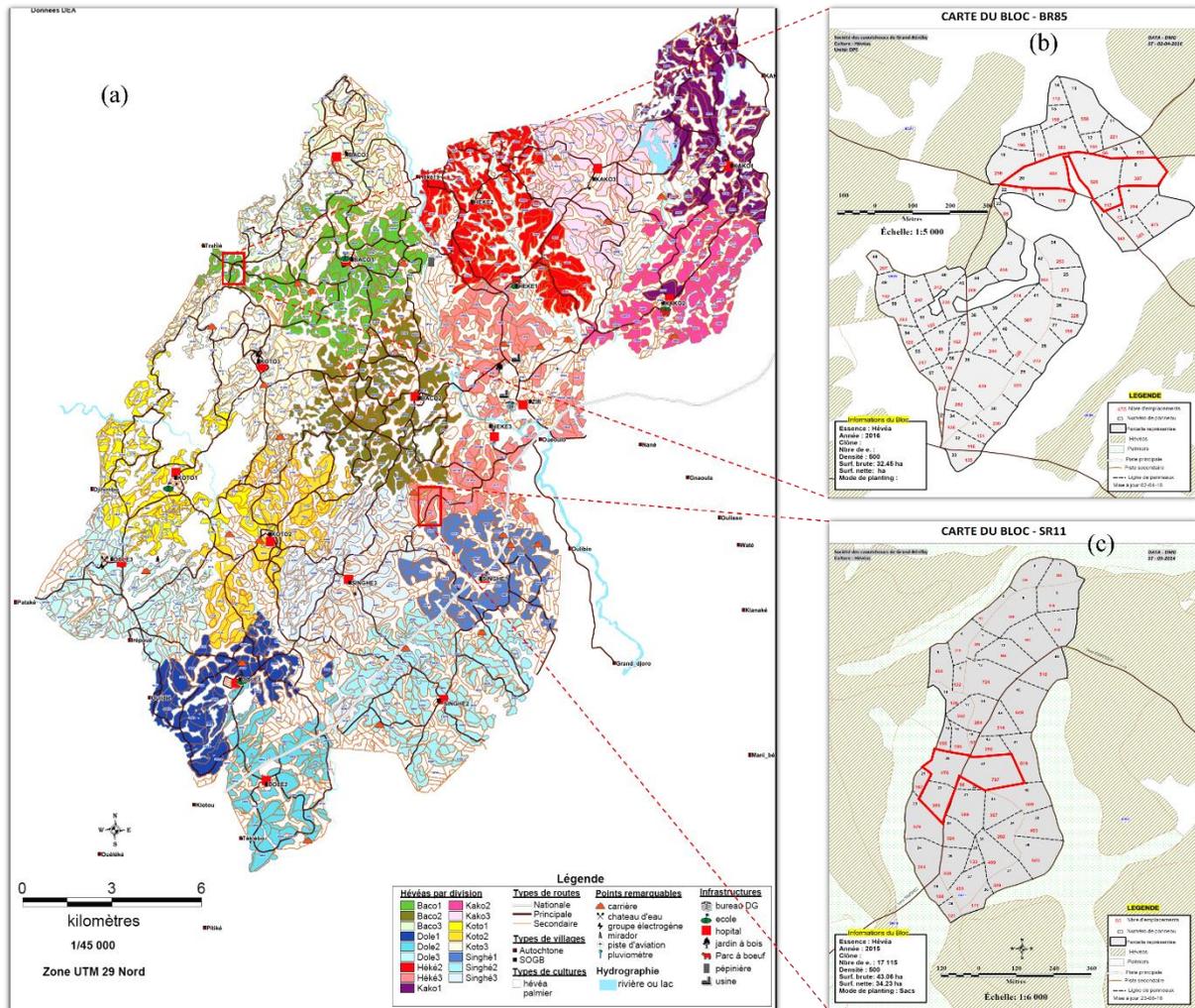


Figure 4-1: a. Carte générale des blocs d'hévéa de la SOGB, chaque couleur de cette carte représente une des 18 divisions de la SOGB. b. Carte du bloc BR85 (clone IRCA825). c. Carte du bloc SR11 (clone IRCA41). Les zones encadrées en rouge sur les cartes a) et b) représentent les panneaux sélectionnés pour les différentes expérimentations.

4.2.1 Sélection des arbres

La première étape de l'échantillonnage pour cet essai consistait à identifier des paires d'arbres situés l'un à côté de l'autre et dans une même rangée. Les deux arbres de la paire sont espacés de 2,5 m environ et sont à 8 m d'un arbre de la ligne voisine. Le critère principal pour le choix des paires était la circonférence minimum de mise en saignée (mise en exploitation) des arbres, qui est fixée à 50 cm à 1 m du sol. Pour atteindre le nombre de paires fixé pour ce dispositif, soit 20 paires du clone IRCA825 et 20 du clone IRCA41, nous avons toléré un écart de ± 3 cm au sein d'une paire et entre arbres. Le second critère tout aussi important sur les arbres sélectionnés était l'absence de fourche, les arbres ayant des fourches trop basses étaient systématiquement écartés. Ainsi dans une paire, l'arbre haubané était celui dont le tronc était le plus droit possible (fourche assez haute). A noter que du fait du traitement, les arbres haubanés voient leur risque de casse au vent amoindri. Par contre, les arbres non-haubanés restent sujet à la casse. Aussi, des arbres supplémentaires non-haubanés ont été sélectionnés pour assurer le nombre de 20 couples à la fin de l'expérimentation. Ce complément d'échantillonnage « de sécurité » était composé de 5 arbres IRCA825 pris dans le panneau 7, et 5 arbres IRCA41 pris dans le panneau 20. Le **Tableau 4-I** présente la liste des arbres sélectionnés pour le dispositif

de haubannage ainsi que les deux modalités de l'essai, à savoir : « arbre haubané », noté aH et « arbre témoin », noté aT.

Tableau 4-I: Liste des arbres sélectionnés pour le dispositif de haubannage. Les arbres sont groupés par paire et classés par ordre croissant du numéro de panneau et du numéro de la ligne. Le statut de l'arbre correspond aux deux modalités de l'essai, 'aH' pour « arbre haubané » et 'aT' pour « arbre témoin ».

IRCA825					IRCA41				
N° de Panneau	Arbre	Ligne	Identification de l'arbre	Statut de l'arbre	N° de Panneau	Arbre	Ligne	Identification de l'arbre	Statut de l'arbre
6	11	4	A11L4	aT	20	11	1	A11L1	aT
6	12	4	A12L4	aH	20	12	1	A12L1	aH
7	23	5	A23L5	aT	20	16	1	A16L1	aT
7	24	5	A24L5	aH	20	15	1	A15L1	aH
7	39	6	A39L6	aT	20	7	5	A7L5	aT
7	38	6	A38L6	aH	20	8	5	A8L5	aH
7	19	7	A19L7	aT	20	12	5	A12L5	aT
7	20	7	A20L7	aH	20	11	5	A11L5	aH
7	22	9	A22L9	aT	20	15	8	A15L8	aT
7	23	9	A23L9	aH	20	16	8	A16L8	aH
7	24	10	A24L10	aT	20	7	11	A7L11	aT
7	25	10	A25L10	aH	20	8	11	A8L11	aH
7	34	10	A34L10	aT	22	6	10	A6L10	aT
7	33	10	A33L10	aH	22	5	10	A5L10	aH
7	13	13	A13L13	aT	22	3	13	A3L13	aT
7	12	13	A12L13	aH	22	2	13	A2L13	aH
7	13	15	A13L15	aT	42	9	6	A9L6	aT
7	14	15	A14L15	aH	42	10	6	A10L6	aH
8	5	5	A5L5	aT	42	14	7	A14L7	aT
8	4	5	A4L5	aH	42	13	7	A13L7	aH
20	13	9	A13L9	aT	42	19	8	A18L8	aT
20	12	9	A12L9	aH	42	18	8	A19L8	aH
20	16	9	A16L9	aT	42	8	9	A8L9	aT
20	15	9	A15L9	aH	42	9	9	A9L9	aH
20	18	10	A18L10	aT	42	42	9	A42L9	aT
20	17	10	A17L10	aH	42	43	9	A43L9	aH
20	9	11	A9L11	aT	42	7	10	A7L10	aT
20	10	11	A10L11	aH	42	8	10	A8L10	aH
20	19	12	A19L12	aT	42	11	10	A11L10	aT
20	18	12	A18L12	aH	42	12	10	A12L10	aH
20	13	13	A13L13	aT	42	24	10	A24L10	aT
20	14	13	A14L13	aH	42	25	10	A25L10	aH
20	12	15	A12L15	aT	42	32	10	A32L10	aT
20	11	15	A11L15	aH	42	31	10	A31L10	aH
20	14	15	A14L15	aT	42	8	13	A8L13	aT
20	13	15	A13L15	aH	42	9	13	A9L13	aH
20	26	15	A26L15	aT	42	9	14	A8L14	aT
20	25	15	A25L15	aH	42	8	14	A9L14	aH
20	18	18	A18L18	aT	42	18	15	A17L15	aT
20	19	18	A19L18	aH	42	17	15	A18L15	aH
7	16	5	A16L5	aT	20	16	3	A16L3	aT
7	20	8	A20L8	aT	20	17	4	A17L4	aT
7	23	8	A23L8	aT	20	14	5	A14L5	aT
7	44	8	A44L8	aT	20	7	6	A7L6	aT
7	2	13	A2L13	aT	20	18	7	A18L7	aT

4.2.2 Mise en place et suivi de l'essai

Avant la mise en place des haubans, la première étape consistait à effectuer des relevés de morphométrie à savoir : mesure de la hauteur des arbres, de la hauteur de la première branche, de la circonférence à 1 m et 1,7 m. Cette étape était immédiatement suivie du choix, au sein de la paire, de l'arbre à haubaner et du témoin, puis de la mesure de la hauteur du point de fixation des haubans. Une fois la hauteur de haubanage identifiée, il fallait identifier la direction des haubans. La seconde étape consistait à mettre en place les haubans disposés en triangle équilatéral autour de l'arbre et ancrés au pied de 3 arbres situés dans les deux rangées voisines.

Nous avons dû adapter notre dispositif de haubanage (**Figure 4-2a**) aux questions logistiques et aux conditions de terrain, afin de limiter les coûts d'acheminement du matériel sur les sites d'expérimentation en Côte d'Ivoire. A la place des câbles en aciers habituellement utilisés par beaucoup de professionnels en arboriculture, nous avons conçu un système constitué de 3 sangles à cliquet de 5 m de longueur ($F_{\text{rupture}} = 1500 \text{ daN}$), 3 câbles synthétiques de 8 mm de diamètre (COUSIN TRESTEC, Sequorope, $E = 92 \text{ GPa}$, $F_{\text{rupture}} = 6500 \text{ daN}$), 3 maillons rapides de 6 mm de diamètre, 3 plaquettes fixes en acier de 8 mm d'épaisseur et des vis inoxydables. Le choix du câble synthétique peut paraître étonnant mais les dernières évolutions technologiques conduisent maintenant à des câbles ayant sensiblement la rigidité de l'acier avec un module d'Young de près de 100 GPa (environ 120 GPa pour l'acier) et des résistances à la rupture élevées (6500 daN contre 6600 daN pour un câble acier de même diamètre). Par contre, sa densité 8 fois plus légère que l'acier joue un rôle déterminant dans le cadre de la logistique (transport et mise en place sur le terrain). La mise en place des haubans peut se décomposer comme suit :

- On visse les plaquettes (**Figure 4-2b**) sur le tronc à environ 6 m de hauteur à l'aide d'une visseuse à chocs, suivant les trois directions identifiées et on accroche dans chaque direction un maillon rapide. Ce système de vis a été préféré au système de cerclage de la tige qui comprime le cambium et empêche le passage de la sève (Bonnesoeur, 2016) ;
- On effectue une épissure à chaque extrémité d'un câble synthétique de 5 à 10 m de long (selon la distance entre l'arbre à haubaner et le point d'ancrage), puis on accroche une extrémité dudit câble au maillon rapide et l'autre extrémité est reliée à une extrémité d'une sangle à cliquet ;
- On enroule un morceau de câble synthétique (avec double épissure) d'environ 1 m au pied de l'arbre d'ancrage, puis on relie les deux épissures du câble à la seconde extrémité de la sangle à cliquet. Une première tension est réalisée à l'aide de ce câble à cliquet. Pour éviter le glissement du câble le long du tronc, la sangle est bloquée par des vis (**Figure 4-2c**)

Après que les 3 haubans sont correctement disposés, on applique la tension finale à l'aide du cliquet.

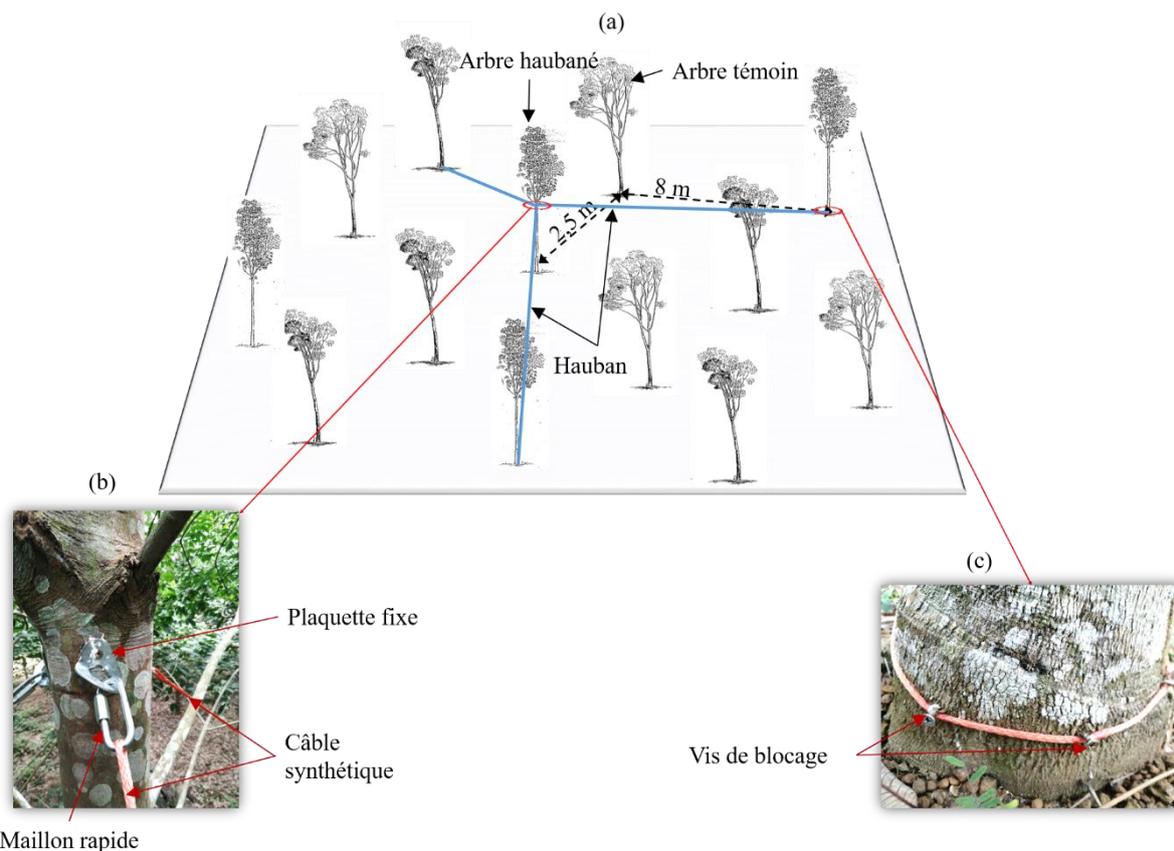


Figure 4-2: a. Schéma du dispositif d'haubanage. b. Zoom de la zone de fixation du hauban en hauteur sur le tronc. c. Zoom de la zone d'ancrage des haubans au pied des arbres voisins.

Pour cette expérimentation, un suivi de croissance est ensuite effectué tous les 6 mois par une équipe de la SOGB et lors de nos missions annuelles en Côte d'Ivoire. Ce suivi de croissance consiste simplement à mesurer le diamètre des arbres (dans les directions parallèle et perpendiculaire à la rangée d'arbres) à l'aide d'un compas forestier ainsi que leur circonférence (à l'aide d'un mètre ruban) à 1,70 m du sol (**Figure 4-3**). Cette hauteur a été choisie assez haut pour éviter que nos mesures ne soient perturbées par la saignée qui elle se fait habituellement de façon descendante à partir de 1,20 m environ. Bien qu'il ne soit pas prévu de mettre ces arbres expérimentaux en saignée, nous avons ainsi voulu homogénéiser la hauteur de suivi de croissance entre tous les différents dispositifs expérimentaux dans lesquels certains arbres peuvent être saignés. En plus du diamètre et de la circonférence, la hauteur des arbres est également mesurée à l'aide du télémètre Vertex IV et de son transpondeur. Il est toutefois important de signaler que cette dernière mesure est assez difficile à effectuer à cause du couvert très dense, de la densité de plantation et la difficulté d'identifier correctement la cime de l'arbre mesurée. Ces mesures ne figurent donc pas dans l'analyse des données qui sera présentée ici. L'équipe locale du Département des Techniques Agricoles de la SOGB se charge en plus de vérifier régulièrement la tension des haubans, notamment après une période très venteuse et de remplacer éventuelles vis qui viendraient à casser.



Figure 4-3: Echantillonnage et marquage de la hauteur de suivi de croissance des arbres du dispositif d’haubanage. Les paires d’arbres (haubané et témoin non-haubanés) sont sélectionnés côte à côte, dans une même ligne. Le marquage à la peinture signifie aussi aux saigneurs que ces arbres ne doivent pas être considérés en production de latex.

4.3 Premiers résultats et discussion

4.3.1 Perception des stimulations mécaniques dues au vent chez les clones IRCA825 et IRCA41

Depuis quelques années, les effets du haubanage sur la croissance des arbres, particulièrement sur la croissance secondaire, commencent à être documentés. Lorsqu’un arbre est empêché de bouger librement au vent, il voit sa croissance radiale fortement réduite. Cette réduction de la croissance est interprétée comme le signe d’une absence de perception, par la partie inférieure de la tige, des déformations mécaniques dues au vent. Or, comme on le sait désormais ces sollicitations stimulent la croissance secondaire de l’arbre. Il a même été identifié que ce sont les déformations mécaniques qui sont le facteur physique perçu localement. Les mesures de circonférence effectuées sur les arbres haubanés et leur témoin non-haubané nous ont d’abord permis de vérifier l’efficacité du dispositif. Ensuite, les mesures de croissance effectuées nous ont permis de quantifier la capacité de chacun des clones IRCA825 et IRCA41 à percevoir les sollicitations mécaniques et à y répondre par les processus thigmomorphogénétiques, l’objectif étant de tenter d’observer une éventuelle variabilité interclonale. Les résultats de ces mesures de croissance ont aussi pour objectif d’être convertis en termes de comportement mécanique à l’aide d’un modèle simple de RDM.

L’expérimentation a été mise en place en décembre 2020 et était prévue jusqu’en 2023 afin de faire ressortir des résultats statiquement représentatifs. Nous ne présentons donc ici que des résultats préliminaires sur la croissance. Dix-huit mois après la mise en place de l’essai, il nous faut constater que l’analyse statistique préliminaire des mesures brutes de circonférence ne permet pas au premier abord de se rendre compte de l’efficacité du dispositif du haubanage. En effet, comme on peut le voir sur la **Figure 4-4**, les circonférences moyennes des arbres haubanés sont très similaires à celles des arbres témoins chez les deux clones. Lors de la mise en place de l’essai en décembre 2020, la circonférence moyenne des arbres haubanés était de de 50,2

$\pm 1,6$ cm pour le IRCA825 (**Figure 4-4a**) et $51,0 \pm 1,7$ cm pour IRCA41 (**Figure 4-4b**) ; tandis que chez les arbres témoins elle était de $48,9 \pm 2,2$ cm pour le premier clone et $49,3 \pm 1,6$ cm pour le second. C'est cette différence entre les circonférences initiales des arbres haubanés et celles de leurs témoins qui explique l'évolution de circonférences au cours du temps observé sur la **Figure 4-4**.

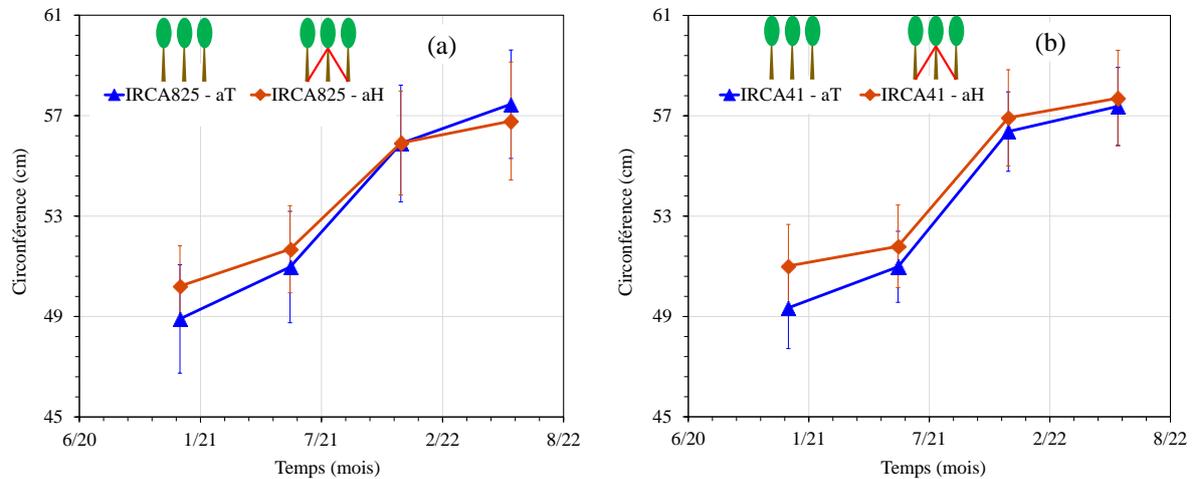


Figure 4-4: Evolution au cours du temps de la circonférence des arbres haubanés (aH) et des arbres témoins (aT). **a.** Circonférence moyenne des arbres chez le clones IRCA825. **b.** Circonférence moyenne des arbres chez le clone IRCA41. Les barres verticales sur chaque courbe correspondent aux écart-types.

Ces résultats sur données brutes de circonférence masquent cependant un effet bien réel visible sur la croissance. Afin de bien mettre en évidence les effets du haubannage, nous avons comparé la croissance secondaire des arbres issus des deux traitements (haubanés vs témoins). Cette croissance correspond à la différence entre la circonférence initiale des arbres (mesurée en décembre 2020) et la circonférence mesurée après chaque période de 6 mois. La **Figure 4-5** présente la distribution de la croissance des arbres haubanés et des arbres témoins durant les 3 premiers semestres qui ont suivi la mise en place de l'essai. Contrairement aux données brutes de circonférence présentées précédemment, les données de croissance montrent de façon assez nette une différence entre les arbres haubanés et leurs témoins chez les deux clones.

En effet, chez le clone IRCA825 la circonférence moyenne des arbres témoins est passée de $48,9 \pm 2,2$ cm (initialement en décembre 2020) à $51,0 \pm 2,2$ cm au bout de 6 mois et à $57,5 \pm 2,2$ cm au bout de 18 mois (**Figure 4-5a**). Ceci correspond à des croissances moyennes de $2,1 \pm 0,7$ cm et $8,6 \pm 1,5$ cm respectivement pour les deux périodes précédemment citées. Pour les arbres haubanés (toujours chez IRCA825), la circonférence moyenne initialement de $50,2 \pm 1,6$ cm est passée à $51,7$ au bout de 6 mois et à $56,8$ au bout de 18 mois ; soit une croissance de $1,5 \pm 0,5$ cm après 6 mois et de $6,6 \pm 1,3$ cm après 18 mois.

Cet effet du haubannage des arbres sur la croissance secondaire est également observable chez le clone IRCA41 (**Figure 4-5b**). Les arbres témoins de ce clone ont montré une croissance moyenne de $1,6 \pm 0,7$ cm au bout de 6 mois (la circonférence moyenne passant de $49,3 \pm 1,6$ cm à $51,0 \pm 1,4$ cm) et de $8,0 \pm 1,2$ cm au bout de 18 (la circonférence moyenne passant de $49,3 \pm 1,6$ cm à $57,4 \pm 1,6$ cm). Pour les arbres haubanés la croissance moyenne a été beaucoup plus faible, soit $0,8 \pm 0,3$ cm au bout de 6 mois (la circonférence moyenne passant de $51,0 \pm 1,7$ cm à $51,8 \pm 1,6$ cm) et $6,6 \pm 1,1$ cm au bout de 18 mois (la circonférence moyenne passant de $51,0 \pm 1,7$ cm à $57,7 \pm 1,9$ cm).

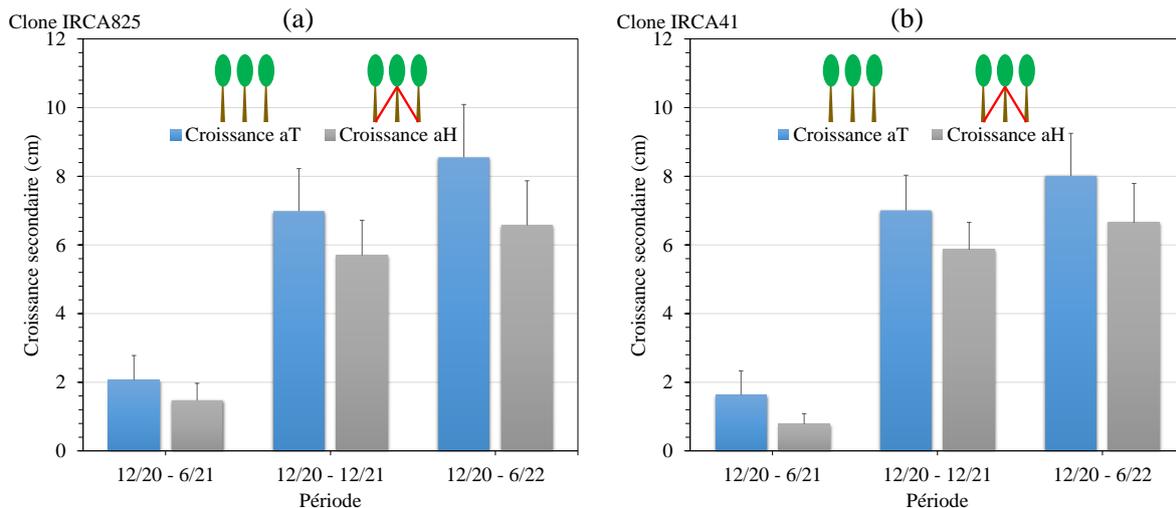


Figure 4-5: Distribution de la croissance cumulée des arbres haubanés (aH) et des arbres témoins (aT) au cours des 3 premières périodes de mesure ; de 12/20 à 6/21, de 12/20 à 12/21 et de 12/20 à 6/22. **a.** Croissance secondaire des arbres du clones IRCA825. **b.** Croissance secondaire des arbres du clone IRCA41. Les barres verticales correspondent aux écart-types.

Les tests de comparaison effectués (**Figure 4-5**) sur les populations « témoins vs haubanés » indiquent, pour chacun des clones, que les différences observées entre la croissance secondaire des arbres haubanés est bien significativement plus faible que celle des arbres témoins et cela pour les 2 clones :

- Pour IRCA825, la différence de croissance vaut 0,6 cm (avec $p=0,003$) au bout de 6 mois et vaut 2 cm (avec $p=0,004$) au bout de 18 mois ;
- Pour IRCA41, la différence de croissance vaut 0,8 cm ($p=0,0001$) au bout de 6 mois et vaut 1,4 cm ($p=0,001$) au bout de 18 mois.

La comparaison relative de ces différences de croissance est impressionnante puisque cela veut dire que pour IRCA825, la croissance des témoins était 40% (respectivement encore +30%) plus importante que celle des arbres haubanés au bout de 6 mois (et 18 mois respectivement).

Pour IRCA41, la même analyse conduit à observer que la croissance des témoins était aussi de 100% (respectivement +21%) plus importante que celle des arbres haubanés au bout de 6 mois de traitement (18 mois respectivement).

Ces différences de croissance entre les arbres issus des deux traitements (haubanés vs témoins) montrent bien l'effet très impressionnant du traitement d'haubanage sur la croissance secondaire des arbres des clones IRCA825 et IRCA41.

Ces résultats corroborent les travaux de Bonnesoeur et al (2016) sur perchis de hêtres qui avaient mis en lumière pour la première fois l'impact des sollicitations mécaniques du vent sur la croissance secondaire. L'hévéa à son tour, montre donc ici clairement qu'il est une essence susceptible de réponse thigmomorphogénétique importante.

4.3.2 Comparaison interclonale de la perception des stimulations mécaniques dues au vent

L'analyse comparative entre les croissances de IRCA41 et IRCA825 montre qu'il est difficile à ce stade de tirer des conclusions sur une potentielle variation interclonale. Au bout de 6 mois de traitement, IRCA825 montrait un effet thigmomorphogénétique de +40% alors que IRCA41 montrait un effet thigmomorphogénétique de +100%, laissant supposer une capacité

d'acclimatation aux sollicitations mécaniques plus importante pour ce dernier. En revanche, au bout de 18 mois, la différence se resserre puisque IRCA825 montre encore un effet thigmomorphogénétique de +30% alors que IRCA41 ne montre plus qu'un effet de l'ordre de +21%. Une interprétation possible serait que IRCA41 pourrait avoir une capacité thigmomorphogénétique plus importante qui l'amène à répondre très rapidement en termes de croissance, le conduisant ainsi dans une situation mécaniquement plus confortable en quelques mois ; réduisant ainsi la « nécessité » de continuer à réagir fortement durant les mois suivants.

Cette analyse reste hypothétique et il apparaît ici clairement que pour une analyse complète de ces résultats sur une variabilité interclonale, il est nécessaire de poursuivre l'expérimentation jusqu'à la fin prévue en 2023.

4.3.3 Conséquences sur le comportement mécanique des tiges

Rappelons tout d'abord que la rigidité de flexion 'EI' est le produit du moment quadratique $I=c^4/(64.\pi^3)$ (avec c, la circonférence à une période donnée) et du module d'élasticité 'E' (lié aux propriétés intrinsèques du matériau bois de la tige). Les résultats du chapitre 2 ont montré entre autres que cette rigidité de flexion est majoritairement pilotée par le moment quadratique, c'est-à-dire par la géométrie de la tige. Ainsi, la comparaison du moment quadratique entre les arbres témoins et haubanés permet de se rendre compte du bénéfice mécanique apporté par la croissance des arbres au vent. Pour ce faire, nous avons regardé l'incrément de moment quadratique $\Delta I= I - I_0$, avec : I le moment quadratique de la section à une période donnée et I_0 le moment quadratique initial.

Chez le clone IRCA825, les calculs effectués montrent que la croissance observée au bout de 6 mois (et 18 mois respectivement) a entraîné un incrément $\Delta I= 5,2 \times 10^{-6} \text{ m}^4$ (et $2,6 \times 10^{-5} \text{ m}^4$ respectivement) chez les arbres témoins. Tandis que chez les arbres haubanés pour les mêmes périodes, l'incrément vaut $\Delta I= 4,0 \times 10^{-6} \text{ m}^4$ (et $2,1 \times 10^{-5} \text{ m}^4$ respectivement). On note ainsi une augmentation du moment quadratique de 32% (et respectivement de +27%) plus importante chez les arbres témoins comparativement aux arbres haubanés après 6 mois (et 18 mois respectivement) de croissance.

Des observations similaires peuvent se faire au niveau du clone IRCA41 où la croissance observée a entraîné un incrément $\Delta I= 4,1 \times 10^{-6} \text{ m}^4$ (au bout de 6 mois) et $\Delta I= 2,5 \times 10^{-5} \text{ m}^4$ (au bout de 18 mois) chez les arbres témoins. Chez les arbres haubanés par contre, on note pour les mêmes périodes un incrément $\Delta I= 2,3 \times 10^{-6} \text{ m}^4$ et $2,2 \times 10^{-5} \text{ m}^4$ respectivement. De même pour ce clone, on peut voir que l'augmentation du moment quadratique chez les arbres témoins a été 83% (et +13% respectivement) plus important que chez les arbres haubanés après 6 mois (et 18 mois respectivement) de croissance.

Ces analyses montrent bien d'une part que la croissance secondaire induite par la perception des sollicitations mécaniques augmente significativement le moment quadratique de la section chez les deux clones. D'autre part, ces résultats montrent qu'une faible croissance secondaire de la tige se traduit par une augmentation importante du moment quadratique. Cette augmentation du moment quadratique entraîne par conséquent une augmentation de la rigidité de flexion 'EI' de la tige. Des résultats très similaires ont été obtenus par Dongmo et al (2022) dans leur dispositif du haubannage sur des Hêtres (*Fagus sylvatica*). Ces derniers ont notamment observé que les arbres issus du traitement d'haubannage avaient un volume de tige plus important que leur témoin non haubané.

Cependant, nous avons vu dans le chapitre introductif que la perception des stimulations mécaniques dues au vent s'accompagne non seulement d'une modification de la morphologie

de l'arbre, mais aussi d'une modification des propriétés du bois. De plus les résultats présentés au chapitre 2 montrent que le couplage d'une prise au vent plus importante et des propriétés mécaniques du bois plus faibles expliquerait la sensibilité à la casse au vent du clone IRCA825 comparativement au clone IRCA41. Or, quelques rares publications ont montré que les sollicitations mécaniques impactent aussi fortement la structure du bois formé (Roignant et al., 2018) ainsi que les propriétés mécaniques qui en résultent (Niez et al., 2020). Il serait donc intéressant, à la fin des traitements du haubanage, de prévoir des analyses comparatives de la structure du bois formé sous contraintes de déformation dues au vent chez les arbres témoins et haubanés ; et entre les deux clones.

Dans la continuité de cette expérimentation comparative, il serait aussi très intéressant de prévoir des tests de flexion d'arbres sur pied, menés jusqu'à la rupture, afin de mettre en évidence le bénéfice adaptatif procuré par le processus de thigmomorphogenèse sur le comportement mécanique de l'arbre et sa sensibilité à la casse. Ces nouvelles expérimentations de terrain pourraient peut-être permettre de mettre en lumière des différences de bénéfice adaptatif entre les clones IRCA41 et IRCA825.

Chapitre 5: Conclusion générale et Perspectives

5.1 Synthèse des résultats acquis

Les objectifs principaux de cette thèse étaient d'évaluer et comparer le comportement mécanique de deux clones d'hévéa avec des sensibilités à la casse au vent contrastées (le clone IRCA825 réputé sensible et le clone IRCA41 réputé résistant) et de chercher les paramètres biomécaniques qui peuvent expliquer les éventuelles différences. D'autre part, nous avons émis l'hypothèse de différence de réponse thigmomorphogénétique qui impacte les modes de croissance des arbres exposés au vent.

L'analyse descriptive de la morphologie des arbres a montré tout d'abord que le clone IRCA825 a un houppier plus volumineux que le clone IRCA41. Cette différence de taille du houppier est essentiellement due à un houppier qui commence plus bas (première branche verte) et à une croissance plus rapide (en hauteur et en diamètre) de ce dernier. La croissance rapide du clone IRCA825 par rapport au IRCA41 se traduit par aussi par des circonférences de tronc similaires malgré qu'il soit plus jeune d'un an. L'analyse des croissances a aussi montré que le clone IRCA41 est plus stable au vent, du fait de son élancement plus faible comparativement au clone IRCA825. Cette meilleure stabilité du clone résistant se traduit également par une masse du houppier plus faible comparativement au clone sensible. L'ensemble de ces paramètres de dimension a permis d'estimer un facteur de sécurité FS qui se révèle plus élevé pour IRCA41. Autrement dit, les différences notables au niveau de la morphologie du houppier et de sa masse, leur répartition globale se traduisent par des différences entre les paramètres de comportement mécanique des arbres vis-à-vis de la flexion, donnant des arguments explicatifs de la différence de sensibilité à la casse observée par les planteurs.

L'analyse du comportement mécanique des tiges n'a pas montré de différence de rigidité de flexion chez les clones IRCA825 et IRCA41. C'est-à-dire que les arbres de ces deux clones présentent des rigidités de flexion du tronc similaires. Toutefois, l'analyse biomécanique a mis en lumière des différences interclonales au niveau des propriétés du matériau bois. Le clone IRCA41 (résistant à la casse au vent) se caractérise par une rigidité du bois plus élevée, mais surtout par une résistance du bois à la rupture significativement plus importante en comparaison avec le clone IRCA825 (sensible à la casse au vent). Ici encore, cette résistance du bois plus faible, couplée à une prise au vent plus importante, explique la plus grande sensibilité à la casse des tiges du clone IRCA825 comparativement au clone IRCA41. L'analyse comparative de la structure du bois a mis en évidence des différences qui ont permis de comprendre l'origine de la différence de rigidité et de résistance du bois observée entre les deux clones. Le clone IRCA41 se caractérise au niveau structurel par une densité du bois nettement plus importante que le clone IRCA825. A l'échelle de la paroi cellulaire en revanche, les deux clones se caractérisent par des AMF peut différents et des rigidités de la paroi (module spécifique) quasi identiques. C'est donc la différence de densité du bois qui explique majoritairement la différence de propriétés mécaniques entre les deux clones.

L'analyse de la structure du bois a permis en plus de mettre en évidence des stratégies de croissance différentes entre les deux clones. Le clone IRCA825 se distingue du clone IRCA41 par une croissance plus rapide, avec des variations croissantes de propriétés de la moelle vers l'écorce. La combinaison de ces deux facteurs pourrait à terme conduire à une bonne résistance au vent des tiges de IRCA825, pour peu que les planteurs acceptent de retarder sa mise en saignée de 1 ou 2 ans afin d'assurer sa mise en sécurité. En effet, l'effet de la mise en saignée va principalement se traduire par une réduction drastique de la croissance secondaire qui est le

facteur d'ordre 1 pour la mise en sécurité mécanique. Il sera donc primordial de comparer les impacts respectifs de la saignée sur les 2 clones pour pouvoir conclure sur le comportement à venir.

Les résultats présentés dans ce travail de thèse tendent à montrer que le facteur de sécurité proposé par Noyer (2017) couplé à des mesures de densité du bois, peuvent permettre d'avoir une bonne estimation de la sensibilité à la casse au vent. En effet, le premier cité (facteur de sécurité) rend assez bien compte de la répartition globale de l'allométrie des arbres ; tandis que le second rend compte de la résistance du bois. Ce travail a ici permis de mettre en évidence que l'approche biomécanique théorique, couplée à des mesures de terrain, permet d'appréhender avec pertinence la question de la sensibilité à la casse des hêvéas. Elle a permis de mettre en évidence les différences structurelles de ces deux clones qui conduisent à expliquer les observations de terrain rapportées par les planteurs. Il serait maintenant particulièrement intéressant d'appliquer cette approche biomécanique à d'autres clones d'hêvéas afin d'évaluer la variabilité interclonale et de proposer ainsi un outil aux sélectionneurs.

La présente étude a permis de mettre évidence pour la première fois, la capacité de perception des stimulations mécaniques dues au vent chez les clones d'hêvéa. L'analyse des résultats préliminaires des essais de haubannage a montré des effets chez les deux clones (réduction de croissance secondaire des arbres haubanés) dès 6 mois après la mise en place du traitement. Ces résultats préliminaires semblent montrer que le clone IRCA41 a une capacité de réponse plus importante que le clone IRCA825, ce qui se traduit par un effet du traitement de haubannage plus fort durant les 6 premiers mois de suivi. Toutefois, pour conclure sur cette analyse de la différence interclonale de la réponse aux déformations dues au vent, il est encore nécessaire de poursuivre l'expérimentation pendant encore au moins une année. De plus, la croissance des arbres reste assez faible, après seulement 18 mois de traitement, ce qui ne permet pas à ce stade d'avoir des résultats conséquents sur le bénéfice mécanique au niveau de la tige des arbres. Il faut également ajouter que la faible quantité de matière produite au cours de ces 18 mois de traitement, permet encore moins d'évaluer les bénéfices de ce traitement au niveau des propriétés du bois produit par chaque clone. Ainsi, dans la continuité de cette expérimentation comparative, il serait pertinent de prévoir des tests de flexion d'arbres sur pied, menés jusqu'à la rupture, pour quantifier le bénéfice mécanique au niveau des tiges. Ces essais pourront être suivis par une analyse de la structure du bois (mesure de densité du bois).

5.2 Perspectives

5.2.1 A court terme : Dispositif expérimental de retard de saignée

Les essais de caractérisation du comportement mécanique des arbres et du bois effectués dans le cadre de ce travail de thèse n'ont pas permis de quantifier les effets de la saignée sur ledit comportement mécanique. Comme on a pu le voir, le clone IRCA825 (sensible à la casse au vent) dispose d'une croissance rapide, avec des propriétés du bois plus fortes à la périphérie du tronc. Mais ces résultats ont été obtenus sur des arbres non saignés. Or, il est bien connu que la saignée entraîne une réduction de la croissance (avec un effet plus important sur la croissance secondaire) des arbres. Par contre, les conséquences de cette réduction de la croissance sur le comportement mécanique de la tige, notamment sur la rigidité de flexion n'ont jamais été quantifiées ; de même que l'impact potentiel de cette saignée sur les propriétés du bois formé. Pour évaluer ces effets de la saignée sur le comportement mécanique des arbres, nous avons mis en place un essai dit de « retard de saignée ».

L'essai de retard de saignée consiste tout simplement à sélectionner des paires ou triplets d'arbres dont une partie est mis en saignée à la date habituellement choisie par les planteurs et

l'autre partie est retardée de plusieurs années. Cet essai a été mis en place dans deux plantations distinctes sur deux clones réputés sensibles à la casse au vent : le clone IRCA825 et le clone PB314. L'hypothèse principale de cet essai est que le retard de la saignée peut permettre au clone sensible de se renforcer mécaniquement afin de mieux résister ; en d'autres termes, de poursuivre son acclimatation thigmomorphogénétique sans avoir à pâtir de l'impact de la saignée sur l'allocation de carbone vers la croissance secondaire.

Sur le clone IRCA825 (dont les arbres ont été plantés en 2016), le dispositif complet de cet essai est constitué de 20 paires d'arbres, soit 2 traitements : 20 arbres saignés et 20 arbres retardés (non saignés). Ces paires ont été sélectionnées côte-à-côte et sur la même ligne avec 50 ± 3 cm de circonférence à 1 m du sol comme critère d'appariement. Cet essai a été mis en place en mars 2021, ce qui fait 2 ans de retard de saignée en mars 2023. Sur le clone PB314 (dont les arbres ont été plantés en 2013) le dispositif est constitué de 20 paires d'arbres sélectionnées côte-à-côte, sur la même ligne et avec des circonférences moyennes de 58 ± 3 cm. A ces 20 paires, nous avons ajouté 20 arbres sélectionnés dans le même bloc mais dont la saignée a débuté en 2020. Cet essai a lui aussi été mis en place en mars 2021, nous avons ainsi 3 traitements pour ce clone : 20 arbres retardés de 3 ans, 20 arbres retardés de 2 ans et 20 arbres saignés depuis 3 ans. Les résultats sont attendus pour la fin de l'année 2023.

5.2.2 A long terme

L'analyse biomécanique effectuée dans le cadre de ce travail de thèse a été faite uniquement sur deux clones. Les résultats ont bien montré des différences de propriété du bois entre le clone sensible à la casse au vent et le clone résistant, notamment au niveau la densité. Pour intégrer ce paramètre comme critère de sélection des clones, il serait intéressant d'étendre l'étude comparative de la densité du bois à d'autres clones aux sensibilités à la casse au vent différentes. Ces mesures de densité pouvant être faites à partir de carottes prélevées sur des arbres issus de champs de clones à petite échelle.

Afin de compléter les résultats de ce travail, il serait intéressant d'obtenir des données spécifiques au type de peuplement étudié, à savoir : des profils de vitesse de vent sur un couvert de type hévéa et le coefficient de traînée sur ledit couvert.

La propension de certains clones d'hévéas à pousser penché soulève la question sur les mécanismes de redressement de l'arbre. Il serait intéressant, d'étudier la question de la mise en place des contraintes de maturation, l'excentricité de la croissance secondaire et la variabilité de la formation de bois de tension ou du bois de flexion, qui jouent également un rôle dans le comportement de l'arbre au vent.

Enfin, les résultats de ce travail de thèse ayant montré une capacité d'acclimatation thigmomorphogénétique des clones IRCA825 et IRCA41, il pourrait être pertinent de prendre en compte cette capacité naturelle dans le processus de sélection des clones.

Bibliographie

- Abd Karim, Y., 2017. Modelling the rubber tree system. <https://doi.org/10.25560/49915>
- Ahoba, A., 1985. Etude de la qualité du bois d'hévéa en relation avec la casse au vent pour la recherche et la définition de critères de sélection précoce. Mémoire de DEA en Sciences du bois, option Mécanique, soutenu à Nancy le 9.
- Ahoba, A., N'guessan, K.A., Nemlin, G.J., Coulibaly, B., 2011. Evaluation de quelques caractéristiques dendrométriques de trois clones d'*Hevea brasiliensis* Muell Arg. (PR 107, PB 86, GT 1). *Agronomie Africaine* 23, 227-236–236.
- Aiso, H., Ishiguri, F., Takashima, Y., Iizuka, K., Yokota, S., 2014. Reaction Wood Anatomy in a Vessel-Less Angiosperm *Sarcandra Glabra*. *IAWA J* 35, 116–126. <https://doi.org/10.1163/22941932-00000053>
- Albuquerque, A.R., Castro, V.R. de, Lobão, M.S., Sarto, C., Tomazello Filho, M., Guedes, F.T.P., 2016. Comparative analysis of anatomy and micro-densitometry of the growth rings of hardwoods and conifers, with emphasis on dendrochronology. *Sci. For.* 44. <https://doi.org/10.18671/scifor.v44n111.06>
- Ali, M.F., Akber, Md.A., Smith, C., Aziz, A.A., 2021. The dynamics of rubber production in Malaysia: Potential impacts, challenges and proposed interventions. *Forest Policy and Economics* 127, 102449. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2021.102449>
- Alméras, T., Fournier, M., 2009. Biomechanical design and long-term stability of trees: Morphological and wood traits involved in the balance between weight increase and the gravitropic reaction. *Journal of Theoretical Biology* 256, 370–381.
- Alméras, T., Jullien, D., Gril, J., 2018. Modelling, Evaluation and Biomechanical Consequences of Growth Stress Profiles Inside Tree Stems, in: Geitmann, A., Gril, J. (Eds.), *Plant Biomechanics*. Springer International Publishing, Cham, pp. 21–48. https://doi.org/10.1007/978-3-319-79099-2_2
- Ancelin, P., Courbaud, B., Fourcaud, T., 2004. Development of an individual tree-based mechanical model to predict wind damage within forest stands. *Forest ecology and management* 203, 101–121.
- Archer, R.R., 1987. On the origin of growth stresses in trees: Part 1: Micro mechanics of the developing cambial cell wall. *Wood Sci. Technol.* 21, 139–154. <https://doi.org/10.1007/BF00376194>
- Badel, E., Ewers, F.W., Cochard, H., Telewski, F.W., 2015. Acclimation of mechanical and hydraulic functions in trees: impact of the thigmomorphogenetic process. *Front. Plant Sci.* 6. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00266>
- Bardet, S., Gril, J., 2002. Modelling the transverse viscoelasticity of green wood using a combination of two parabolic elements. *Comptes Rendus Mécanique* 330, 549–556. [https://doi.org/10.1016/S1631-0721\(02\)01503-6](https://doi.org/10.1016/S1631-0721(02)01503-6)
- Barnett, J.R., Bonham, V.A., 2004. Cellulose microfibril angle in the cell wall of wood fibres. *Biological Reviews* 79, 461–472. <https://doi.org/10.1017/S1464793103006377>
- Becquey, J., Riou-Nivert, P., 1987. L'existence de “zones de stabilité” des peuplements. Conséquences sur la gestion. *Rev. For. Fr.* 323. <https://doi.org/10.4267/2042/25804>
- Bonnesoeur, V., 2016. Acclimatation des arbres forestiers au vent: de la perception du vent à ses conséquences sur la croissance et le dimensionnement des tiges.
- Bonnesoeur, V., Constant, T., Moulia, B., Fournier, M., 2016. Forest trees filter chronic wind-signals to acclimate to high winds. *New Phytol* 210, 850–860. <https://doi.org/10.1111/nph.13836>
- Bossu, J., Lehnebach, R., Corn, S., Regazzi, A., Beauchêne, J., Clair, B., 2018. Interlocked grain and density patterns in *Bagassa guianensis*: changes with ontogeny and

- mechanical consequences for trees. *Trees* 32, 1643–1655.
<https://doi.org/10.1007/s00468-018-1740-x>
- Bouychou, J.G., 1963. Manuel du planteur d'hévéa: la biologie de l'hévéa. Société d'éditions techniques continentales.
- Brancheriau, L., 2013. Caractérisation acoustique et ultrasonore des produits bois et composites (HDR). UM2.
- Brancheriau, L., 2006. Influence of cross section dimensions on Timoshenko's shear factor – Application to wooden beams in free-free flexural vibration. *Ann. For. Sci.* 63, 319–321. <https://doi.org/10.1051/forest:2006011>
- Brancheriau, L., 2002. EXPERTISE MECANIQUE DES SCIAGES PAR ANALYSES DES VIBRATIONS DANS LE DOMAINE ACOUSTIQUE (phdthesis). Université de la Méditerranée - Aix-Marseille II.
- Brancheriau, L., Kouchade, C., Brémaud, I., 2010. Internal friction measurement of tropical species by various acoustic methods. *J Wood Sci* 56, 371–379.
<https://doi.org/10.1007/s10086-010-1111-8>
- Brancheriau, L., Paradis, S., 2007. Bing 9-Beam Identification by Non-destructive Grading.
- Callado, C., da Silva Neto, S., Scarano, F., Costa, C., 2001. Periodicity of growth rings in some flood-prone trees of the Atlantic Rain Forest in Rio de Janeiro, Brazil. *Trees* 15, 492–497. <https://doi.org/10.1007/s00468-001-0128-4>
- Catesson, A.-M., Lachaud, S., 1993. Le cambium, structure, fonctionnement et contrôle de l'activité saisonnière. *Acta Botanica Gallica* 140, 337–350.
<https://doi.org/10.1080/12538078.1993.10515605>
- Cave, I.D., 1997. Theory of X-ray measurement of microfibril angle in wood: Part 1. The condition for reflection X-ray diffraction by materials with fibre type symmetry. *Wood Sci. Technol.* 31, 143–152. <https://doi.org/10.1007/BF00705881>
- Charmet, J.-C., 2005. Mécanique du solide et des matériaux Elasticité-Plasticité-Rupture. ESPCI-Laboratoire d'Hydrodynamique et Mécanique Physique 113–144.
- Chevalier, A., 1948. La situation des plantations d'Hévéa dans le monde de 1939 à 1948. *jatba* 28, 297–316. <https://doi.org/10.3406/jatba.1948.6169>
- Chevalier, Y., 1988. Comportements élastique et viscoélastique des composites. *Techniques de l'Ingénieur* 5.
- Chiba, Y., 2000. Modelling stem breakage caused by typhoons in plantation *Cryptomeria japonica* forests. *Forest Ecology and Management* 135, 123–131.
[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00304-2](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00304-2)
- Clair, B., Ruelle, J., Beauchêne, J., Prévost, M.F., Fournier, M., 2006. Tension Wood and Opposite Wood in 21 Tropical Rain Forest Species. *IAWA J* 27, 329–338.
<https://doi.org/10.1163/22941932-90000158>
- Clair, B., Thibaut, B., 2014. Physical and Mechanical Properties of Reaction Wood, in: Gardiner, B., Barnett, J., Saranpää, P., Gril, J. (Eds.), *The Biology of Reaction Wood*, Springer Series in Wood Science. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 171–200. https://doi.org/10.1007/978-3-642-10814-3_6
- Clément-Demange, A., Chapuset, T., Legnaté, H., Costes, E., Doumbia, A., Obouayeba, S., Nicolas, D., 1995a. Wind damage: the possibilities of an integrated research for improving the prevention of risks and the resistance of clones in the rubber tree [WWW Document]. Symposium on physiological and molecular aspects of the breeding of *Hevea brasiliensis*. URL <http://agritrop.cirad.fr/464410/> (accessed 10.14.19).
- Clément-Demange, A., Legnaté, H., Seguin, M., Carron, M., Le Guen, V., Chapuset, V., Nicolas, D., 1997. L'hévéa. *Amélioration génétique des plantes tropicales* 357–383.

- Clément-Demange, A., Nicolas, D., Legnaté, H., Rivano, F., Le Guen, V., Gnagne, M.Y., Chapuset, T., 1995b. Hévéa: stratégies de sélection. *Plantations, recherche, développement* 2, 5–19.
- Clément-Demange, A., Priyadarshan, P.M., Hoa, T.T., Venkatachalam, P., 2007. Hevea rubber breeding and genetics. *Plant breeding reviews* 29, 177.
- Colin, F., Vinkler, I., Riou-Nivert, P., Renaud, J.-P., Hervé, J.-C., Bock, J., Piton, B., 2009. Facteurs de risques de chablis dans les peuplements forestiers: les leçons tirées des tempêtes de 1999. *La forêt face aux tempêtes*, edited by: Birot, Y., Landmann, G., and Bonhême, I., Editions Quae, INRA, Versailles, France 177–228.
- Combe, J.-C., Du Plessix, C.-J., 1974. Étude du développement morphologique de la couronne de *Hevea brasiliensis* (Müll. Arg. Euphorbiacées-Crotonoïdées), in: *Annales Des Sciences Forestières*. EDP Sciences, pp. 207–228.
- Compagnon, P., 1986a. Le caoutchouc naturel : biologie, culture, production. *Maisonneuve et Larose*.
- Compagnon, P., 1986b. Exploitation: La saignée de l'hévéa, in: *Le caoutchouc naturel : biologie, culture, production*. p. 215.
- Constant, T., Nepveu, G., Becker, G., 2007. Les contraintes de croissance et le hêtre: état des connaissances et perspectives. *Rendez-vous Techniques de l'ONF* 76–84.
- Coutand, C., 2000. Biomechanical study of the effect of a controlled bending on tomato stem elongation: local strain sensing and spatial integration of the signal. *Journal of Experimental Botany* 51, 1825–1842. <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.352.1825>
- Coutand, C., Dupraz, C., Jaouen, G., Ploquin, S., Adam, B., 2008. Mechanical Stimuli Regulate the Allocation of Biomass in Trees: Demonstration with Young *Prunus avium* Trees. *Annals of Botany* 101, 1421–1432. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn054>
- Coutand, C., Jeronimidis, G., Chanson, B., Loup, C., 2004. Comparison of mechanical properties of tension and opposite wood in *Populus*. *Wood Science and Technology* 38, 11–24. <https://doi.org/10.1007/s00226-003-0194-4>
- Coutand, C., Martin, L., Leblanc-Fournier, N., Decourteix, M., Julien, J.-L., Moulia, B., 2009. Strain Mechanosensing Quantitatively Controls Diameter Growth and *PtaZFP2* Gene Expression in Poplar. *Plant Physiol.* 151, 223–232. <https://doi.org/10.1104/pp.109.138164>
- De Mil, T., Tarelkin, Y., Hahn, S., Hubau, W., Deklerck, V., Debeir, O., Van Acker, J., de Cannière, C., Beeckman, H., Van den Bulcke, J., 2018. Wood Density Profiles and Their Corresponding Tissue Fractions in Tropical Angiosperm Trees. *Forests* 9, 763. <https://doi.org/10.3390/f9120763>
- Déjardin, A., Laurans, F., Arnaud, D., Breton, C., Pilate, G., Leplé, J.-C., 2010. Wood formation in Angiosperms. *Comptes Rendus Biologies* 333, 325–334. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2010.01.010>
- Dellus, V., 2004. Test de tractions, 1res applications en France. *Revue horticole: la revue technique des pépiniéristes, horticulteurs et maraichers* 30–34.
- Déon, M., Fumanal, B., Gimenez, S., Bieysse, D., Oliveira, R.R., Shuib, S.S., Breton, F., Elumalai, S., Vida, J.B., Seguin, M., Leroy, T., Roeckel-Drevet, P., Pujade-Renaud, V., 2014. Diversity of the cassiicolin gene in *Corynespora cassiicola* and relation with the pathogenicity in *Hevea brasiliensis*. *Fungal Biology* 118, 32–47. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2013.10.011>
- Détienne, P., 1989. Appearance and periodicity of growth rings in some tropical woods. *IAWA Journal* 10, 123–132.
- Détienne, P., Mariaux, A., 1977. Nature et périodicité des cernes dans les bois rouges de méliacées africaines. *Bois & Forêts des Tropiques* 175, 52–61.
- Dinwoodie, J.M., 1981. *Timber, its nature and behaviour*. Van Nostrand Reinhold, New York.

- Donaldson, L.A., Singh, A.P., 2016. Reaction Wood, in: *Secondary Xylem Biology*. Elsevier, pp. 93–110. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802185-9.00006-1>
- Dongmo, K.J.J.H., Dlouha, J., Fournier, M., Moulia, B., Ningre, F., Constant, T., 2022. No matter how much space and light are available, radial growth distribution in *Fagus sylvatica* L. trees is under strong biomechanical control. *Annals of Forest Science* 79, 44. <https://doi.org/10.1186/s13595-022-01162-8>
- Dupont, S., 2016. A simple wind–tree interaction model predicting the probability of wind damage at stand level. *Agricultural and Forest Meteorology* 224, 49–63. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.04.014>
- Eloy, C., Fournier, M., Lacoïnte, A., Moulia, B., 2017. Wind loads and competition for light sculpt trees into self-similar structures. *Nat Commun* 8, 1014. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00995-6>
- Engonga Edzang, A.C., Niez, B., Heim, L., Fourcaud, T., Gril, J., Moulia, B., Badel, E., 2022. Wind safety of rubber trees in plantation: methodological analysis of bending experiments on inclined standing trees. *Bois & Forêts des Tropiques* 354, 65–77. <https://doi.org/10.19182/bft2022.354.a---->
- Evans, R., Elic, J., 2001. Rapid prediction of wood stiffness from microfibril angle and density. *Forest products journal* 51.
- Fourcaud, T., 2005. *Modélisation des relations biomécanique-morphogenèse à l'échelle de l'arbre et applications (Habilitation à diriger des recherches)*. CNRS.
- Fourcaud, T., Clément-Demange, A., Costes, E., Baillères, H., Gnagne, M., 1999. Etude de la casse au vent chez l'hévéa: influence du modèle architectural. *Comptendu d'activité d'ATP Cirad No 60*, 16.
- Fourcaud, T., Clément-Demange, A., Costes, E., Gnagne, M., 1998. Description of a simulation approach to investigate wind damage in rubber trees (*Hevea brasiliensis*), in: *IUFRO Conference on Wind and Other Abiotic Risks to Forests*.
- Fournier, M., Bonnesoeur, V., Deleuze, C., Renaud, J.-P., Legay, M., Constant, T., Moulia, B., 2015. Pas de vent, pas de bois. L'apport de la biomécanique des arbres pour comprendre la croissance puis la vulnérabilité aux vents forts des peuplements forestiers. *Rev. For. Fr.* 213. <https://doi.org/10.4267/2042/58173>
- Fournier, M., Chanson, B., Guitard, D., Thibaut, B., 1991a. Mécanique de l'arbre sur pied : modélisation d'une structure en croissance soumise à des chargements permanents et évolutifs. 1. Analyse des contraintes de support. *Ann. For. Sci.* 48, 513–525. <https://doi.org/10.1051/forest:19910503>
- Fournier, M., Chanson, B., Thibaut, B., Guitard, D., 1994. Mesures des déformations résiduelles de croissance à la surface des arbres, en relation avec leur morphologie. Observations sur différentes espèces. *Ann. For. Sci.* 51, 249–266. <https://doi.org/10.1051/forest:19940305>
- Fournier, M., Chanson, B., Thibaut, B., Guitard, D., 1991b. Mécanique de l'arbre sur pied : modélisation d'une structure en croissance soumise à des chargements permanents et évolutifs. 2. Analyse tridimensionnelle des contraintes de maturation, cas du feuillu standard. *Ann. For. Sci.* 48, 527–546. <https://doi.org/10.1051/forest:19910504>
- Fournier, M., Dlouhá, J., Jaouen, G., Almeras, T., 2013. Integrative biomechanics for tree ecology: beyond wood density and strength. *Journal of Experimental Botany* 64, 4793–4815. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert279>
- Gardiner, B., Berry, P., Moulia, B., 2016. Review: Wind impacts on plant growth, mechanics and damage. *Plant Science* 245, 94–118. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.01.006>
- Gardiner, B., Byrne, K., Hale, S., Kamimura, K., Mitchell, S.J., Peltola, H., Ruel, J.-C., 2008. A review of mechanistic modelling of wind damage risk to forests. *Forestry* 81, 447–463. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpn022>

- Gérard, J., Guibal, D., Paradis, S., Vernay, M., Beauchêne, Brancheriau, L., Châlon, I., Daigremont, C., Détienne, P., Fouquet, D., Langbour, P., Lotte, S., Thévenon, M.-F., Méjean, C., Thibaut, A., 2011. *Tropix* 7. <https://doi.org/10.18167/74726F706978>
- Gohet, E., Prévôt, J.-C., Eschbach, J.-M., Clément, A., Jacob, J.-L., 1996. Clone, croissance et stimulation, facteurs de la production de latex. *Plantations, Recherche, Développement*.
- Goodman, A., 1998. Responses of the Root Systems of Sunflower and Maize to Unidirectional Stem Flexure. *Annals of Botany* 82, 347–357. <https://doi.org/10.1006/anbo.1998.0693>
- Goodwin, R., 2021. Trees and seasonal wind gust maxima in Ireland: acclimation and minimal factors of safety. *Arboricultural Journal* 43, 41–54. <https://doi.org/10.1080/03071375.2020.1854994>
- Gril, J., Jullien, D., Bardet, S., Yamamoto, H., 2017. Tree growth stress and related problems. *J Wood Sci* 63, 411–432. <https://doi.org/10.1007/s10086-017-1639-y>
- Guitard, D., 1987. *Mécanique du matériau bois et composites*, Collection Nabla. Cepadues-Editions, Toulouse.
- Guitard, D., El Amri, F., 1987. Modèles prévisionnels de comportement élastique tridimensionnel pour les bois feuillus et les bois résineux. *Ann. For. Sci.* 44, 335–358. <https://doi.org/10.1051/forest:19870305>
- Haines, Daniel.W., Leban, J.-M., Herbé, C., 1996. Determination of Young's modulus for spruce, fir and isotropic materials by the resonance flexure method with comparisons to static flexure and other dynamic methods. *Wood Sci.Technol.* 30. <https://doi.org/10.1007/BF00229348>
- Hale, S.E., Gardiner, B.A., Wellpott, A., Nicoll, B.C., Achim, A., 2012. Wind loading of trees: influence of tree size and competition. *Eur J Forest Res* 131, 203–217. <https://doi.org/10.1007/s10342-010-0448-2>
- Héban, C., De Fay, E., 1980. Functional Organization of the Bark of *Hevea brasiliensis* (Rubber Tree): A Structural and Histoenzymological Study. *Zeitschrift für Pflanzenphysiologie* 97, 391–398. [https://doi.org/10.1016/S0044-328X\(80\)80013-4](https://doi.org/10.1016/S0044-328X(80)80013-4)
- Hofmann, J.P., 1984. Etude morphogénétique de la couronne de clones d'*Hevea brasiliensis* résistant et sensible à la casse au vent. *Ann. For. Sci.* 41, 87–102. <https://doi.org/10.1051/forest:19840106>
- Husson, J.-M., 2009. Loi de comportement viscoélastique avec effet mémoire. Application à la mécanosorption dans le bois. Docteur de l'Université de Limoges, UNIVERSITE DE LIMOGES.
- Jacob, J.L., Prevot, J.C., Lacrotte, R., 1994. Tapping panel dryness in *Hevea brasiliensis*. *Plantations, Recherche, Développement (France)* 1, 15–24.
- Jodin, P., 1994. *Le bois: matériau d'ingénierie*. Association pour la recherche sur le bois en Lorraine, Nancy (France).
- Jourez, B., 2010. *Anatomie et identification des bois*.
- Kollmann, F.F.P., Côté, W.A., Jr., 1968. *Principles of Wood Science and Technology: I Solid Wood*. Springer International Publishing, Cham.
- Le Guen, V., 2008. Exploration de la diversité des résistances génétiques à la maladie sud-américaine des feuilles de l'hévéa (*Microcyclus ulei*) par cartographie et génétique d'association au sein de populations naturelles. Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc.
- Lecomte-Schmitt, B., 2014. Taxons rares en xylologie: problèmes d'identification et d'interprétation. *archeosciences* 87–95. <https://doi.org/10.4000/archeosciences.4172>
- Leplae, E., 1926. La culture de l'Hévéa au Congo Belge. *jatba* 6, 204–218. <https://doi.org/10.3406/jatba.1926.4401>
- Lespinasse, D., Rodier-Goud, M., Grivet, L., Leconte, A., Legnate, H., Seguin, M., 2000. A saturated genetic linkage map of rubber tree (*Hevea* spp.) based on RFLP, AFLP,

- microsatellite, and isozyme markers. *Theor Appl Genet* 100, 127–138. <https://doi.org/10.1007/s001220050018>
- Meng, S.X., 2006. Reducing stem bending increases the height growth of tall pines. *Journal of Experimental Botany* 57, 3175–3182. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl079>
- Milet, J., 2001. Analyse de l'architecture et comparaison de deux clones d'hévea (*Hevea brasiliensis*) GT1-PB235. Montpellier : UM2, Mémoire DESS : Méthodes statistiques des industries agronomiques, agroalimentaires et pharmaceutiques : Université Montpellier 2 98.
- Moore, J., Gardiner, B., 2001. Relative windfirmness of new zealand-grown *Pinus radiata* and Douglas-fir: a preliminary investigation. *New Zealand Journal of Forestry Science* 31, 208–223.
- Moore, J.R., Cown, D.J., Lee, J.R., McKinley, R.B., Brownlie, R.K., Jones, T.G., Downes, G.M., 2014. The influence of stem guying on radial growth, stem form and internal resin features in *radiata* pine. *Trees* 28, 1197–1207. <https://doi.org/10.1007/s00468-014-1030-1>
- Mothe, F., Duchanois, G., Zannier, B., Leban, J.-M., 1998. Analyse microdensitométrique appliquée au bois : méthode de traitement des données utilisée à l'Inra-ERQB (programme Cerd). *Ann. For. Sci.* 55, 301–313. <https://doi.org/10.1051/forest:19980303>
- Moulia, B., Coutand, C., Julien, J.-L., 2015. Mechanosensitive control of plant growth: bearing the load, sensing, transducing, and responding. *Front. Plant Sci.* 6. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00052>
- Moulia, B., Der Loughian, C., Bastien, R., Martin, O., Rodríguez, M., Gourcilleau, D., Barbacci, A., Badel, E., Franchel, G., Lenne, C., Roeckel-Drevet, P., Allain, J.M., Frachisse, J.M., de Langre, E., Coutand, C., Fournier-Leblanc, N., Julien, J.L., 2011. Integrative Mechanobiology of Growth and Architectural Development in Changing Mechanical Environments, in: Wojtaszek, P. (Ed.), *Mechanical Integration of Plant Cells and Plants, Signaling and Communication in Plants*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 269–302. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19091-9_11
- Mueller, E., Mell, W., Simeoni, A., 2014. Large eddy simulation of forest canopy flow for wildland fire modeling. *Can. J. For. Res.* 44, 1534–1544. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2014-0184>
- Navi, P., Heger, F., 2005. Comportement du bois sous l'action mixte de la température, de l'eau et de la charge mécanique, in: *Comportement Thermo-Hydrromécanique Du Bois: Applications Technologiques et Dans Les Structures*. PPUR presses polytechniques, pp. 93–165.
- Navi, P., Rastogi, PramodK., Gresse, V., Tolou, A., 1995. Micromechanics of wood subjected to axial tension. *Wood Sci. Technol.* 29. <https://doi.org/10.1007/BF00194199>
- Nicolas, D., 1990. L'hévéa: sa sélection: les effets destructifs du vent sur cet arbre, in: *Architecture, Structure, Mécanique de l'arbre*. Deuxième séminaire interne, Université de Montpellier 2 février 1990, pp. 69–79.
- Nicolas, D., 1979. Comportement de quelques clones d'hévea *Hevea brasiliensis* dans le Sud-est de la Côte d'Ivoire. *Revue Générale du Caoutchouc et des Plastiques*.
- Nicolas, D., Hofmann, J.P., 1977. Etude de la présence de bois de tension en relation avec le phénomène de casse au vent chez *Hevea brasiliensis*. Paris.
- Niez, B., 2018. Acclimatation de l'arbre aux flexions répétées et conséquences sur le comportement mécanique et les propriétés hydrauliques du bois vert: Biologie végétale. Thèse de doctorat. Université Clermont Auvergne.
- Niez, B., Dlouha, J., Gril, J., Ruelle, J., Toussaint, E., Moulia, B., Badel, E., 2020. Mechanical properties of “flexure wood”: compressive stresses in living trees improve the

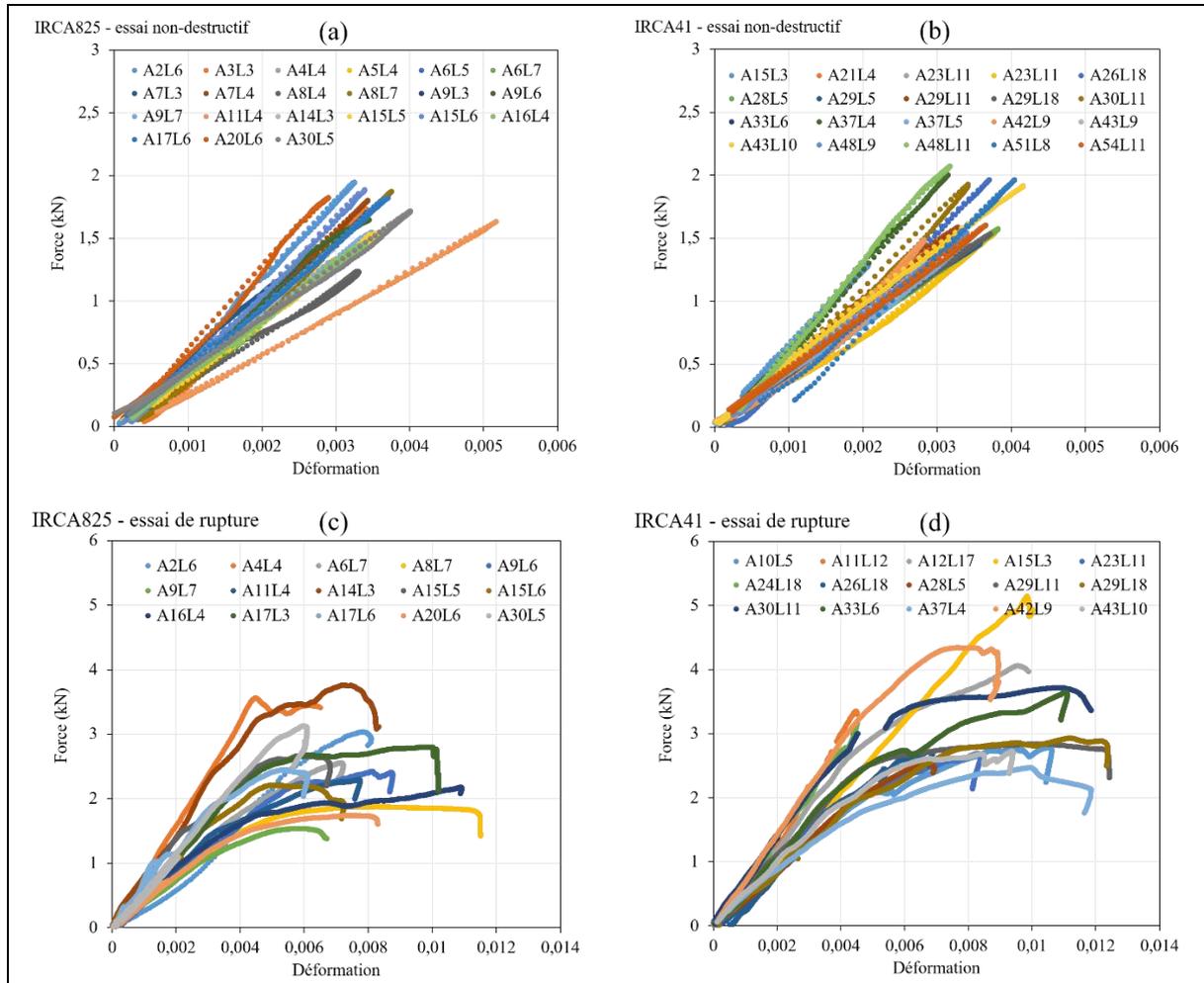
- mechanical resilience of wood and its resistance to damage. *Annals of Forest Science* 77, 17. <https://doi.org/10.1007/s13595-020-0926-8>
- Niez, B., Dlouha, J., Moulia, B., Badel, E., 2019. Water-stressed or not, the mechanical acclimation is a priority requirement for trees. *Trees* 33, 279–291. <https://doi.org/10.1007/s00468-018-1776-y>
- Niklas, K.J., 2000. Computing factors of safety against wind-induced tree stem damage. *Journal of Experimental Botany* 51, 797–806. <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.345.797>
- Niklas, K.J., 1992. *Plant biomechanics: an engineering approach to plant form and function*. University of Chicago Press, Chicago.
- Noyer, E., 2017. Réponses des perches de hêtre (*Fagus sylvatica* L.) à l'ouverture de la canopée: approche multidisciplinaire et multi-échelle. (Thèse de doctorat). AgroParisTech, Paris.
- Obouayeba, S., Boa, D., 1993. Fréquence et repos annuel de saignée d'" *Hevea brasiliensis*", clone PB 235, dans le sud-est de la Côte-d'Ivoire. *Cahiers Agricultures* 2, 387-393 (1).
- Papesch, A.J.G., Moore, J.R., Hawke, A.E., 1997. Mechanical stability of *Pinus radiata* trees at Eyrewell Forest investigated using static tests. *New Zealand Journal of Forestry Science* 27, 188–204.
- Peltola, H.M., 2006. Mechanical stability of trees under static loads. *American journal of botany* 93, 1501–1511.
- Perron, T., Mareschal, L., Laclau, J.-P., Deffontaines, L., Deleporte, P., Masson, A., Cauchy, T., Gay, F., 2021. Dynamics of biomass and nutrient accumulation in rubber (*Hevea brasiliensis*) plantations established on two soil types: Implications for nutrient management over the immature phase. *Industrial Crops and Products* 159, 113084. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113084>
- Petty, J., Swain, C., 1985. Factors influencing stem breakage of conifers in high winds. *Forestry: An International Journal of Forest Research* 58, 75–84.
- Plourde, B.T., Boukili, V.K., Chazdon, R.L., 2015. Radial changes in wood specific gravity of tropical trees: inter- and intraspecific variation during secondary succession. *Funct Ecol* 29, 111–120. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12305>
- Pruyn, M.L., Ewers, B.J., Telewski, F.W., 2000. Thigmomorphogenesis: changes in the morphology and mechanical properties of two *Populus* hybrids in response to mechanical perturbation. *Tree Physiology* 20, 535–540. <https://doi.org/10.1093/treephys/20.8.535>
- Ramos, L., Latorraca, J.V., Neto, T., Martins, L., Severo, D., 2016. Anatomical characterization of tension wood in *Hevea brasiliensis* (Willd. ex a. Juss.) mull. arg.1. *Revista Árvore* 40, 1109–1117. <https://doi.org/10.1590/0100-67622016000600016>
- Rao, P.S., Saraswathyamma, C.K., Sethuraj, M.R., 1998. Studies on the relationship between yield and meteorological parameters of para rubber tree (*Hevea brasiliensis*)¹The paper is based on the work and experience of the authors and in no way reflects the views of the Rubber Board or Department of Science and Technology, Government of India.1. *Agricultural and Forest Meteorology* 90, 235–245. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(98\)00051-3](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(98)00051-3)
- Roden, J.S., Pearcy, R.W., 1993. Effect of leaf flutter on the light environment of poplars. *Oecologia* 93, 201–207. <https://doi.org/10.1007/BF00317672>
- Rodriguez, M., de Langre, E., Moulia, B., 2008. A scaling law for the effects of architecture and allometry on tree vibration modes suggests a biological tuning to modal compartmentalization. *American Journal of Botany* 95, 1523–1537. <https://doi.org/10.3732/ajb.0800161>
- Roignant, J., Badel, É., Leblanc-Fournier, N., Brunel-Michac, N., Ruelle, J., Moulia, B., Decourteix, M., 2018. Feeling stretched or compressed? The multiple mechanosensitive

- responses of wood formation to bending. *Annals of Botany* 121, 1151–1161. <https://doi.org/10.1093/aob/mcx211>
- Roux, Y.L., Pagès, L., 2000. Modifications expérimentales de la morphogénèse du système racinaire de jeunes semis d'hévéa (*Hevea brasiliensis*). *Can. J. Bot.* 78, 1460–1468. <https://doi.org/10.1139/b00-118>
- Ruelle, J., 2014. Morphology, Anatomy and Ultrastructure of Reaction Wood, in: Gardiner, B., Barnett, J., Saranpää, P., Gril, J. (Eds.), *The Biology of Reaction Wood*, Springer Series in Wood Science. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 13–35. https://doi.org/10.1007/978-3-642-10814-3_2
- Salmén, L., Burgert, I., 2009. Cell wall features with regard to mechanical performance. A review COST Action E35 2004–2008: Wood machining – micromechanics and fracture. *Holzforschung* 63. <https://doi.org/10.1515/HF.2009.011>
- Schindler, D., Mohr, M., 2019. No resonant response of Scots pine trees to wind excitation. *Agricultural and Forest Meteorology* 265, 227–244. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.11.021>
- Sellier, D., Fourcaud, T., 2009. Crown structure and wood properties: influence on tree sway and response to high winds. *American journal of botany* 96, 885–896.
- Sellier, D., Fourcaud, T., 2005. A mechanical analysis of the relationship between free oscillations of *Pinus pinaster* Ait. saplings and their aerial architecture. *Journal of experimental botany* 56, 1563–1573.
- Silpi, U., Thaler, P., Kasemsap, P., Lacointe, A., Chantuma, A., Adam, B., Gohet, E., Thaniswanyankura, S., Améglie, T., 2006. Effect of tapping activity on the dynamics of radial growth of *Hevea brasiliensis* trees. *Tree Physiology* 26, 1579–1587. <https://doi.org/10.1093/treephys/26.12.1579>
- Smith, V.C., 2003. The effects of air flow and stem flexure on the mechanical and hydraulic properties of the stems of sunflowers *Helianthus annuus* L. *Journal of Experimental Botany* 54, 845–849. <https://doi.org/10.1093/jxb/erg068>
- Soliva, 1942. L'évolution de la culture du Caoutchouc au cours des dix dernières années. *jatba* 22, 47–69. <https://doi.org/10.3406/jatba.1942.1675>
- Tamasi, E., Stokes, A., Lasserre, B., Danjon, F., Berthier, S., Fourcaud, T., Chiatante, D., 2005. Influence of wind loading on root system development and architecture in oak (*Quercus robur* L.) seedlings. *Trees* 19, 374–384. <https://doi.org/10.1007/s00468-004-0396-x>
- Tang, C., Yang, M., Fang, Y., Luo, Y., Gao, S., Xiao, X., An, Z., Zhou, B., Zhang, B., Tan, X., Yeang, H.-Y., Qin, Y., Yang, Jianghua, Lin, Q., Mei, H., Montoro, P., Long, X., Qi, J., Hua, Y., He, Z., Sun, M., Li, W., Zeng, X., Cheng, H., Liu, Y., Yang, Jin, Tian, W., Zhuang, N., Zeng, R., Li, D., He, P., Li, Z., Zou, Z., Li, S., Li, C., Wang, J., Wei, D., Lai, C.-Q., Luo, W., Yu, J., Hu, S., Huang, H., 2016. The rubber tree genome reveals new insights into rubber production and species adaptation. *Nature Plants* 2, 16073. <https://doi.org/10.1038/nplants.2016.73>
- Telewski, F.W., 2016. Flexure Wood: Mechanical Stress Induced Secondary Xylem Formation, in: *Secondary Xylem Biology*. Elsevier, pp. 73–91. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802185-9.00005-X>
- Telewski, F.W., 1989. Structure and function of flexure wood in *Abies fraseri*. *Tree Physiology* 5, 113–121. <https://doi.org/10.1093/treephys/5.1.113>
- Telewski, F.W., Jaffe, M.J., 1986. Thigmomorphogenesis: Anatomical, morphological and mechanical analysis of genetically different sibs of *Pinus taeda* in response to mechanical perturbation. *Physiol Plant* 66, 219–226. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1986.tb02412.x>
- Thaler, P., 2012. Saigner sans tuer, ou la récolte durable du caoutchouc. *Quatre-Temps* 4.

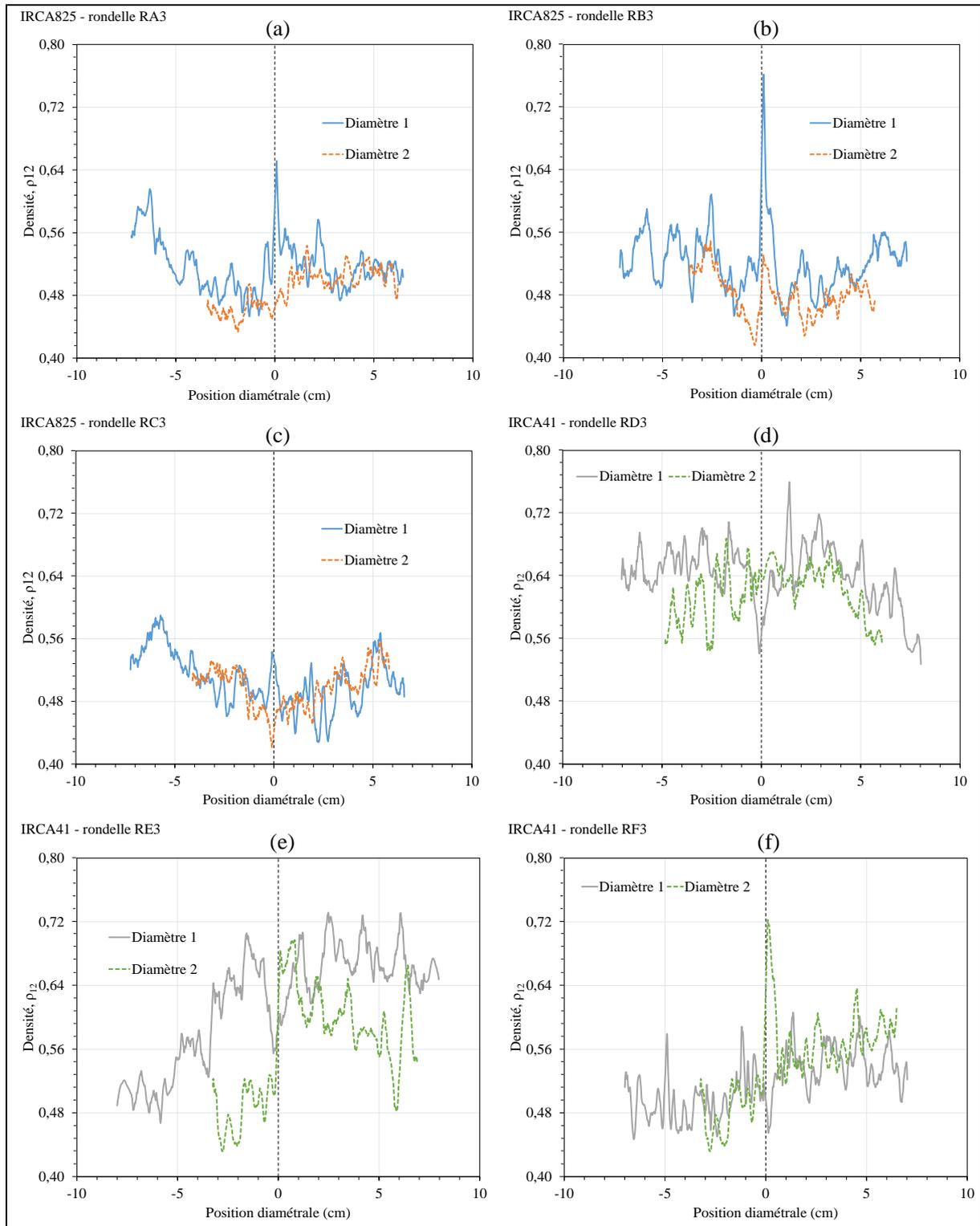
- Thaler, P., Duangngam, O., Kasemsap, P., Sathornkich, J., Chayawat, C., Satakhum, D., Priault, P., Desalme, D., Chantuma, P., Ghashghaie, J., 2016. The source of latex. Tracing carbon from leaf photosynthesis to latex metabolism in rubber trees using carbon stable isotopes. Presented at the CRRI & IRRDB International Rubber Conference 2016, CRRI.
- Thaler, P., Pagès, L., 1997. Competition within the root system of rubber seedlings (*Hevea brasiliensis*) studied by root pruning and blockage. *J Exp Bot* 48, 1451–1459. <https://doi.org/10.1093/jxb/48.7.1451>
- Thibaut, B., Baillères, H., Chanson, B., Fournier-Djimbi, M., 1997. Plantations d'arbres à croissance rapide et qualité des produits forestiers sous les tropiques. *Bois et Forêts des Tropiques* 252, 49–54.
- Timoshenko, S.P., 1955. *Strength of materials Part I. Elementary theory and problems* 165–310.
- Tran, D.M., Clément-Demange, A., Déon, M., Garcia, D., Le Guen, V., Clément-Vidal, A., Soumahoro, M., Masson, A., Label, P., Le, M.T., Pujade-Renaud, V., 2016. Genetic Determinism of Sensitivity to *Corynespora cassiicola* Exudates in Rubber Tree (*Hevea brasiliensis*). *PLoS ONE* 11, e0162807. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0162807>
- Van Gardingen, P., Grace, J., 1991. Plants and Wind, in: *Advances in Botanical Research*. Elsevier, pp. 189–253. [https://doi.org/10.1016/S0065-2296\(08\)60023-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2296(08)60023-3)
- Volper, S., 2012. Une histoire des plantes coloniales: du cacao à la vanille.
- Wessolly, L., 1991. Verfahren zur Bestimmung der Stand- und Bruchssicherheit von Bäumen. *Holz als Roh- und Werkstoff* 49, 99–104. <https://doi.org/10.1007/BF02614347>
- Wiedenhoef, A., 2010. Structure and function of wood. *Wood handbook: wood as an engineering material: chapter 3*. Centennial ed. General technical report FPL; GTR-190. Madison, WI: US Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010: p. 3.1-3.18. 190, 3.1-3.18.
- Xu, P., Liu, H., 2004. Models of microfibril elastic modulus parallel to the cell axis. *Wood Sci Technol* 38. <https://doi.org/10.1007/s00226-004-0235-7>
- Yamamoto, H., Abe, K., Arakawa, Y., Okuyama, T., Gril, J., 2005. Role of the gelatinous layer (G-layer) on the origin of the physical properties of the tension wood of *Acer sieboldianum*. *J Wood Sci* 51, 222–233. <https://doi.org/10.1007/s10086-004-0639-x>
- Yamamoto, H., Kojima, Y., 2002. Properties of cell wall constituents in relation to longitudinal elasticity of wood. *Wood Science and Technology* 36, 55–74. <https://doi.org/10.1007/s00226-001-0128-y>
- Yang, J.L., Evans, R., 2003. Prediction of MOE of eucalypt wood from microfibril angle and density. *Holz als Roh- und Werkstoff* 61, 449–452. <https://doi.org/10.1007/s00107-003-0424-3>
- Yang, M., Défossez, P., Danjon, F., Dupont, S., Fourcaud, T., 2017. Which root architectural elements contribute the best to anchorage of *Pinus* species? Insights from in silico experiments. *Plant and soil* 411, 275–291.
- Yun, T., Jiang, K., Hou, H., An, F., Chen, B., Jiang, A., Li, W., Xue, L., 2019. Rubber Tree Crown Segmentation and Property Retrieval using Ground-Based Mobile LiDAR after Natural Disturbances. *Remote Sensing* 11, 903. <https://doi.org/10.3390/rs11080903>
- Zhu, J., Zhang, Z., 2009. Ethylene stimulation of latex production in *Hevea brasiliensis*. *Plant Signaling & Behavior* 4, 1072–1074. <https://doi.org/10.4161/psb.4.11.9738>
- Zue Ondo, J.L., Ruelle, J., Dlouha, J., Fournier, M., 2021. Caractérisation et variabilité des propriétés physiques et structurelles du bois du kevazingo, *Guibourtia tessmannii*, et de l'okoumé, *Aucoumea klaineana*, provenant des forêts naturelles du Gabon. *Bois for. trop.* 347, 43–59. <https://doi.org/10.19182/bft2021.347.a31939>

Annexes

Annexe 1: Courbe force - déformation des essais de flexion d'arbres sur pied chez les clones IRCA825 et IRCA41. Essai non-destructif de 2021 (a & b). Essai de rupture de 2022 (c & d).



Annexe 2: Profils des variations diamétrales de densité ρ_{12} des différentes rondelles du clone IRCA825 (a, b, c) et du clone IRCA41 (d, e, f).



Annexe 3: Profils des variations diamétrales de l'angle de microfibrilles des différentes rondelles du clone IRCA825 (a) et du clone IRCA41 (b)

