

RAPPORT FINAL

Projet de Recherche et de Développement

2024-2025

Cursus Ingénieur ENSTIB 3ème année

Caractérisation physique et mécanique de bois antillais



Yann Féliers

Antonin Picard

Encadrant : Laurent Bléron



DIRECTION
DE L'ALIMENTATION,
DE L'AGRICULTURE
ET DE LA PÊCHE DE
SAVOIE



cirad



**Enstib
ÉPINAL**

REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche et développement a pu être mené à bien grâce à l'implication et la disponibilité de plusieurs personnes que nous tenions à remercier.

Dans un premier temps, nous voulons remercier l'ensemble des équipes de l'ENSTIB tant pédagogique que technique qui ont su nous accompagner et répondre à nos questions et besoins tout au long de ce projet.

Nous tenons à remercier tout particulièrement, Yves DELAGE, enseignant au Lycée Charles de Gaulle de Chaumont grâce au concours duquel le séchage des bois a pu être réalisé en temps et en heure.

Enfin, nos remerciements vont à l'ensemble du pôle construction du CRITT Bois qui a mis à notre disposition ses machines d'essais, son expertise ainsi que sa technologie d'instrumentation, nous permettant de réaliser la totalité de nos essais dans les meilleures conditions et avec la rigueur attendue pour une campagne de caractérisation de cette ampleur.

Table des matières

I.	Introduction	6
1.	Cadre du projet.....	7
2.	Parties prenantes.....	8
3.	Enjeux et risques	8
II.	Partie bibliographique	9
1.	Généralité sur la composition et la croissance du bois	9
2.	Facteurs influant sur les propriétés mécaniques des bois d'œuvre	12
a)	Bois juvénile	13
b)	Humidité du bois	14
3.	Démarche d'échantillonnage	16
4.	Essais mécaniques	17
III.	Reconstitution des plateaux reçus par transporteur	18
IV.	Palettisation du Mahogany grandes feuilles.....	18
V.	Repérage de l'excentrement à la moëlle.....	20
VI.	Pré-débit des éprouvettes	21
1.	Préparation des éprouvettes pour l'essai de caractérisation physique	21
2.	Préparation des éprouvettes pour les essais de caractérisation mécanique	23
VII.	Séchage à l'air libre des débits de faibles sections	25
VIII.	Séchage artificiel des fortes sections.....	26
IX.	Protocoles d'essais	28
1.	Dispositifs d'essais et de mesure.....	28
2.	Flexion 4 points – Grandes longueurs.....	29
3.	Flexion 4 points – Eprouvettes sans défauts	30
4.	Compression axiale – Eprouvettes sans défauts	31
5.	Compression transversale – Eprouvettes sans défauts	31
6.	Portance locale – Eprouvettes sans défauts	32
7.	Dureté Monnin – Eprouvettes sans défauts	33
8.	Essais de retrait volumique	34
9.	Synthèse des échantillons à éprouver.....	35
X.	Utilisation des mesures relevées dans la détermination des propriétés physiques et mécaniques des essences étudiées.....	36
1.	Module d'élasticité local en flexion axiale	36
2.	Module d'élasticité global en flexion axiale	37

3.	Module d'élasticité en compression axiale.....	38
4.	Module d'élasticité en compression transversale	38
5.	Calcul de la résistance en flexion axiale.....	40
6.	Calcul de la résistance en compression axiale	40
7.	Calcul de la résistance en compression transversale	40
8.	Calcul des propriétés de portance locale.....	41
9.	Calcul des propriétés de retrait volumique.....	41
10.	Calcul de la dureté Monnin.....	42
11.	Calcul de la masse volumique.....	42
XI.	Correction des valeurs calculées et détermination des valeurs caractéristiques	43
1.	Correction des caractéristiques physiques et mécaniques.....	43
2.	Calcul des valeurs caractéristiques.....	44
XII.	Résultats expérimentaux.....	45
1.	Vérification des valeurs moyennes	45
2.	Résultats des essais de flexion 4 points – Eprouvettes en dimensions d'emploi.....	47
3.	Résultats des essais de flexion 4 points – Eprouvettes sans défauts.....	47
4.	Résultats des essais de compression axiale – Eprouvettes sans défauts	48
5.	Résultats des essais de compression transversale– Eprouvettes sans défauts	48
6.	Résultats des essais de Dureté Monnin – Eprouvettes sans défauts	48
7.	Résultats des essais de portance locale – Eprouvettes sans défauts	49
c)	Portance locale parallèle au fil.....	49
d)	Portance locale perpendiculaire au fil.....	49
8.	Résultats des essais de détermination du retrait volumique – Eprouvettes sans défauts	50
XIII.	Analyse des résultats, observations et corrélations possibles.....	51
1.	Analyse des résultats	51
2.	Corrélation entre les différentes propriétés mécaniques	57
3.	Calcul des propriétés mécaniques secondaires	59
4.	Mise en perspective des résultats au regard de l'Eurocode 5	61
XIV.	Conclusion.....	64
XV.	Bibliographie	66
XVI.	Liste des figures.....	68
XVII.	Liste des tableaux.....	70
XVIII.	Annexes.....	71

I. Introduction

1. Cadre du projet

Le projet de recherche et développement intitulé « Caractérisation physique des bois antillais » s'inscrit dans une étude complète d'espèces méconnues des Antilles et plus spécifiquement de Martinique. La première phase de l'étude, comprenant le choix des 5 essences à caractériser ainsi que la récolte des échantillons de bois et l'envoi de ceux-ci, a été réalisée par Xavier DA COL pendant son stage de fin de Master 2 "Science du bois" au sein de l'université de Montpellier.

Le choix des 5 essences parmi les 396 recensées sur l'île de la Martinique a été réalisé après une phase de veille bibliographique des connaissances scientifiques existantes et la récolte d'informations empiriques sur les utilisations historiques des essences présentes.

Le choix final de Xavier DA COL et des différents organismes encadrant l'étude est donc le suivant :

- **Mahogany à grandes feuilles** (*Swietenia macrophylla*), essence non originaire de la Martinique et massivement plantée au XXème siècle lors des plans de reforestation du gouvernement, ce qui en fait l'essence la plus commune dans les zones de production de l'ONF. De plus, cette essence présentant un bois rouge assez léger, stable, relativement durable, bénéficie d'une croissance rapide permettant d'obtenir un arbre mature en 50 ans dans de bonnes conditions là où un chêne en a besoin de 100.
- **Bois rivière** (*Chimarrhis cymosa*), arbre très commun dans les forêts humides de moyenne altitude de Martinique mais peu utilisé jusqu'à présent, Il est facilement mobilisable et se reproduit fréquemment par multiplication végétative.
- **Gommier blanc** (*Dacryodes excelsa*), essence présentant des usages historiques nombreux, notamment la création de pirogues par les premiers habitants de l'île. C'est un grand arbre de la forêt humide potentiellement utilisable en construction.
- **Mahot bleu** (*Hibiscus elatus*), il bénéficie d'un bon développement sur l'île. Plébiscité par plusieurs professionnels locaux, il existe cependant assez peu d'informations scientifiques à son sujet.
- **Poirier pays** (*Tabebuia heterophylla*), c'est un des rares arbres côtiers qui peut donner des grumes de taille suffisante pour une utilisation en construction. Il était, par le passé, très apprécié pour les charpentes et présente un grain fin à l'esthétique indéniable.

Nous avons la charge de la deuxième phase de l'étude composée des étapes suivantes :

- Réalisation des échantillons à partir des plateaux et plots reçus,
- Réalisation des essais mécaniques en dimensions d'emploi (flexion 4 points),
- Réalisation des essais mécaniques sur éprouvettes sans défauts : flexion statique, compression axiale, dureté Monnin, mesure de la masse volumique et du retrait volumique.
- Interprétation et mise en forme des résultats sous forme d'un rapport.
- Conclusion sur les utilisations possibles de ces 5 essences.

2. Parties prenantes

Ce projet de recherche et développement est co-dirigé par l'Office National des Forêts (ONF) de la Martinique, la Direction de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt (DAAF) de la Martinique et le Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD). Il rentre dans les objectifs du PRFB (Programme Régional de la Forêt et du Bois) de Martinique qui fixe les orientations de la gestion forestière entre 2019 et 2029. Les différents représentants des parties prenantes du projet de recherche sont les suivants :

- M. Titouan BARAER, chef du pôle forêt DAAF Martinique,
- Mme Marion SINICO, chargée de mission forêt DAAF Martinique,
- M. Fabien WIRTH, responsable de l'Unité Territoriale (UT) ONF Martinique,
- M. Jacques BEAUCHENE, chercheur en Sciences du bois, Unité Mixte de Recherche Ecologie des Forêts de Guyane (UMR ECOFOG).

3. Enjeux et risques

Le principal enjeu de ce PRD est de caractériser les 5 essences qui nous sont confiées le plus précisément possible afin de pleinement exploiter leur potentiel, en utilisant chacune d'elles à bon escient.

De l'aboutissement de ce projet découlera une meilleure connaissance des essences autochtones et permettra peut-être, dans l'hypothèse d'analyses concluantes et donc l'utilisation de celles-ci par l'industrie, de diminuer la dépendance de l'île vis-à-vis des importations de matière première bois depuis la métropole notamment. Les résultats du projet pourraient contribuer à l'orientation de la gestion forestière de l'ONF sur l'île en favorisant les essences les plus prometteuses sur le plan de l'usage structurel notamment.

On peut également espérer sur le long terme, un redéveloppement de la filière avec de possibles débouchés économiques dans les secteurs de la première, deuxième et troisième transformation de la matière sur l'île.

II. Partie bibliographique

1. Généralité sur la composition et la croissance du bois

L'arbre tel qu'il est représenté sur la Figure 1 se compose de quatre grandes parties de sa base jusqu'à sa cime :

- Les racines, qui participent au développement de l'arbre en allant puiser dans le sol des éléments tels que l'eau ou les sels minéraux pour les partager au reste de l'arbre.
- Le collet, marquant la zone de transition entre le système racinaire et la partie aérienne de l'arbre.
- Le tronc, qui part du collet jusqu'aux premières branches de l'arbre et qui possède un rôle multiple : conduction de sève, soutien mécanique, etc.
- Le houppier, constitué d'un ensemble structuré de branches et du feuillage. Il assure un rôle majeur dans la vie de l'arbre, en apportant l'énergie nécessaire à sa croissance grâce au phénomène de photosynthèse qui se réalise au niveau de ses feuilles.

On va s'intéresser plus particulièrement au tronc dans lequel on vient prélever le bois d'œuvre. Le tronc d'un arbre est composé de différentes couches lui permettant de répondre aux besoins vitaux de l'arbre (conduction de sève brute et élaborée, soutien mécanique, protection des attaques extérieures). De l'extérieur vers l'intérieur ces couches sont :

- Le phelloderme, le phellogène et le phellème qui constituent ensemble le périderme, plus couramment appelé écorce et qui contribue à protéger l'arbre de toutes les agressions extérieures (intempéries, insectes, champignons, etc.)
- Le phloème secondaire également appelé liber dans lequel la sève élaborée (solution riche en glucides) circule du houppier vers le tronc en été et en automne afin d'assurer la croissance de l'arbre.

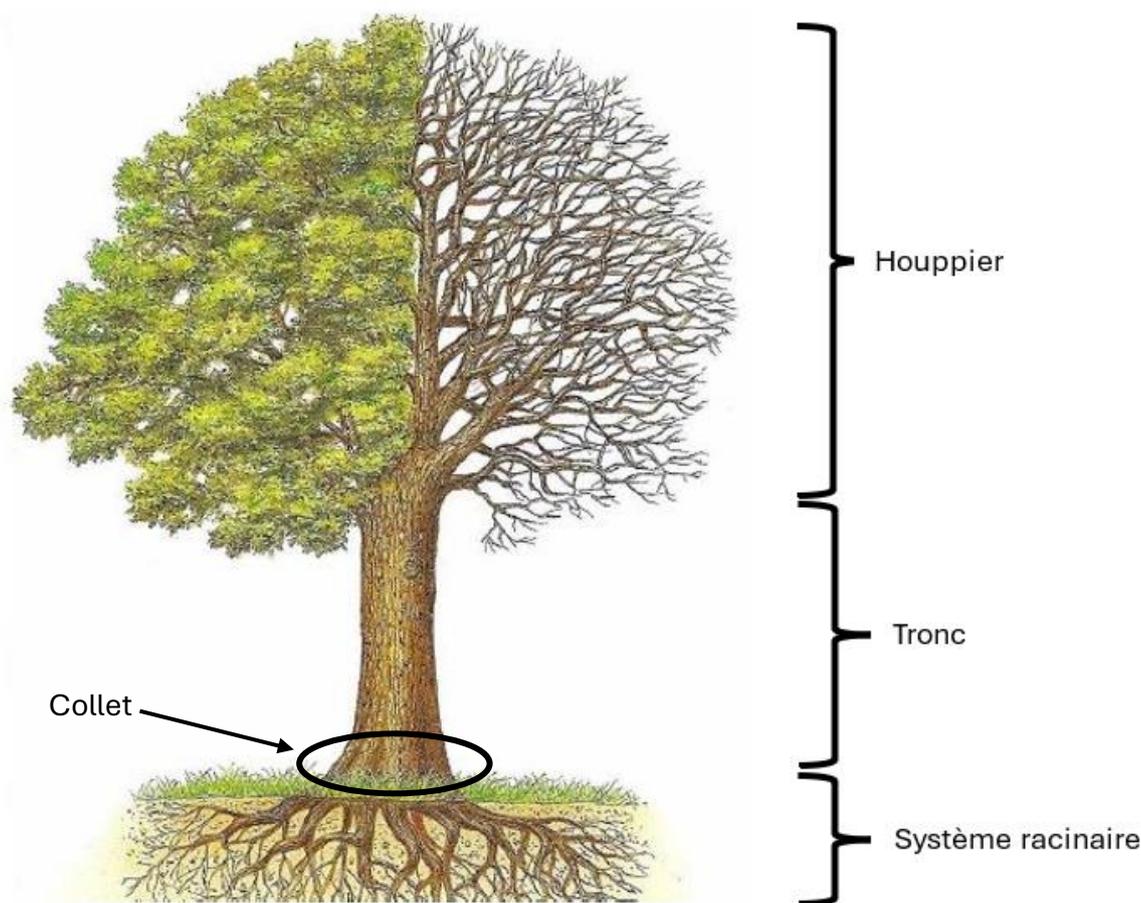


Figure 1 : Schéma type de l'arbre

- Le cambium, constitué de cellules méristématiques va permettre à l'arbre de croître en diamètre au fil des années en produisant de nouvelles couches de liber vers l'extérieur et d'aubier vers l'intérieur. Un cerne correspond au bois formé durant une année et regroupe le bois initial (bois de printemps en régions tempérées et bois formé au début de la saison des pluies dans les zones tropicales) et le bois final (bois d'été en régions tempérées et bois formé à la fin de la saison des pluies dans les zones tropicales).
- L'aubier, est la partie physiologiquement active du xylème secondaire et permet la circulation de la sève brute (eau, minéraux) des racines jusqu'au houppier à travers les vaisseaux.
- Le duramen, ou bois parfait est la partie de l'aubier qui a été duraminisée, il ne comporte quasiment plus de cellules vivantes et participe au soutien mécanique de l'arbre conjointement avec l'aubier.

- La moëlle, qui est un parenchyme spongieux et lacunaire au centre de l'arbre participant au transport et au stockage des éléments nutritifs de l'arbre durant la première année, c'est d'ici que partent les rayons ligneux médullaires.

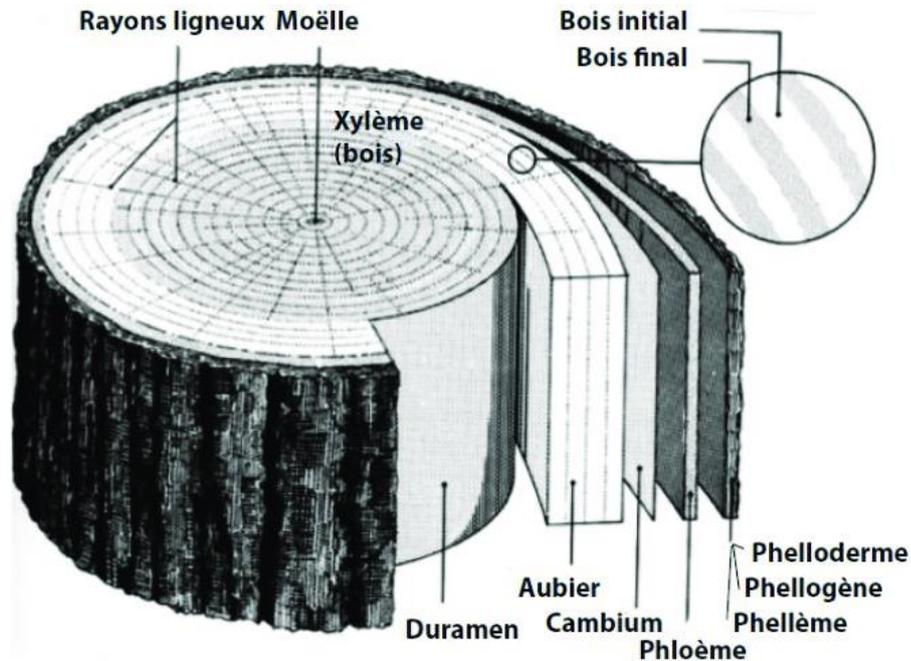


Figure 2 : Schéma anatomique d'un tronc

La microstructure fibreuse, orientée selon l'axe longitudinal de l'arbre (sens du fil, et le mode de croissance de l'arbre par couches externes successives (les cernes) confèrent au bois une anisotropie caractéristique. Du fait de cette anisotropie, les propriétés physiques et mécaniques varient suivant :

- La direction axiale (aussi appelée longitudinale), parallèlement au fil du bois, c'est-à-dire suivant l'axe de croissance de l'arbre ;
- La direction radiale, suivant le rayon (de la moëlle à l'écorce) ;
- La direction tangentielle, perpendiculairement aux directions radiales et axiales.

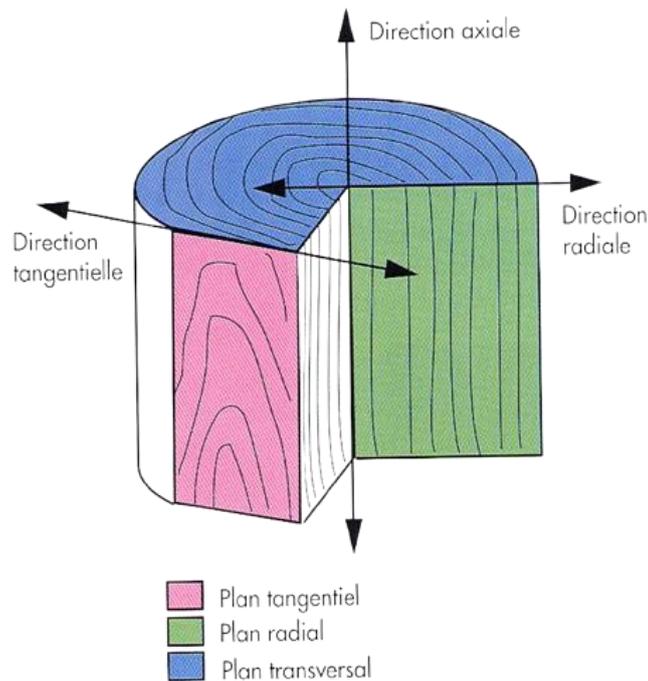


Figure 3 : Plan de référence du bois

Les propriétés physiques et mécaniques du matériau bois sont très variables d'une espèce à une autre, au sein d'un même genre ou d'une même famille botanique, mais également entre individus d'une même espèce, entre peuplements ou au sein d'un même peuplement.

2. Facteurs influant sur les propriétés mécaniques des bois d'œuvre

La provenance et les conditions de croissance de l'arbre influent sur les propriétés physiques et mécaniques du bois. Pour un même individu, ces propriétés sont aussi très variables. La grume constitue un volume de matière hétérogène dont les propriétés varient de différentes manières :

- Radialement, du cœur vers la périphérie, en raison d'un triple phénomène, comprenant l'évolution progressive du bois juvénile au bois adulte, le vieillissement du bois (duraminisation avec transformation de l'aubier en duramen) et les variations radiales plus rapides à l'intérieur d'un même cerne, particulièrement marquées chez les bois de plantation,
- Suivant la circonférence, en relation avec la présence d'un bois aux propriétés particulières, le bois de réaction, encore appelé bois de tension chez les feuillus et bois de compression chez les résineux,
- Suivant la hauteur, de la base de l'arbre jusqu'au houppier. Ces variations sont les moins marquées à l'intérieur de l'arbre. Nous avons cependant pris le parti

d'identifier la hauteur de prélèvement des échantillons les uns par rapport aux autres afin d'étudier l'impact de ce paramètre sur les propriétés mécaniques.

La présence de singularités de structure telles que les nœuds, le contrefil, les défauts de fil, ou bien les défauts tels que les fentes, les déformations, les altérations biologiques, influent sur les performances du matériau et contribuent à la variabilité de ses propriétés physiques et mécaniques. Ces singularités sont déterminées, selon des protocoles normalisés (NF B52-001-1 (1) pour le classement visuel pour l'emploi en structures des bois sciés résineux et feuillus ainsi que la NF EN 1309-3 (2) pour la méthode de mesure des dites singularités et altérations biologiques), sur deux principaux formats de pièces de bois :

- Des éprouvettes sans défaut, de petites dimensions,
- Des pièces de plus grandes dimensions (dimensions d'emploi) intégrant des singularités et des défauts, et qui donnent des résultats davantage représentatifs du comportement technologique du bois mis en œuvre.

Enfin, la vitesse de croissance peut influencer sur les propriétés mécaniques du bois. En effet, chez les feuillus présentant une zone poreuse, il y a une relation étroite entre la dimension des cellules et les conditions de croissance. Les fibres du bois final peuvent être deux à trois fois plus longues que celles du bois initial. L'éclaircissement du tronc peut également modifier la longueur des éléments. Chez les feuillus, les fibres du côté ensoleillé sont plus courtes d'environ 50 μm par rapport à la moyenne de la longueur des fibres de l'espèce, et de 350 μm chez les conifères. Cette variation de qualité et de quantité des fibres implique une modification de la masse volumique de l'arbre qui se traduit potentiellement par un changement des propriétés mécaniques comme J.Viguier (3) l'a démontré dans ses travaux de thèse sur le classement mécanique des bois feuillus et résineux.

Nous avons porté notre attention sur deux paramètres influents majeurs et qui seront développés ci-après :

- L'éloignement de l'échantillon à la moëlle ou autrement dit la différenciation du bois juvénile du bois mature,
- L'humidité des bois.

a) Bois juvénile

Le bois juvénile s'avère problématique dans la caractérisation mécanique du bois. Une étude réalisée par Lanvin (4) montre une corrélation entre propriétés mécaniques et positionnement de la pièce éprouvée dans la grume.

La hauteur de prélèvement de l'échantillon dans la grume (Figure 4) impactera également les propriétés mécaniques. Zobel et al. (5) ont montré sur des pins que la croissance du bois juvénile présentait un aspect cylindrique et une croissance apicale.

Cependant, il est à noter que selon Mille et Louppe (6) dans leur « Memento des bois exotiques », les propriétés mécaniques varient peu le long de la grume.

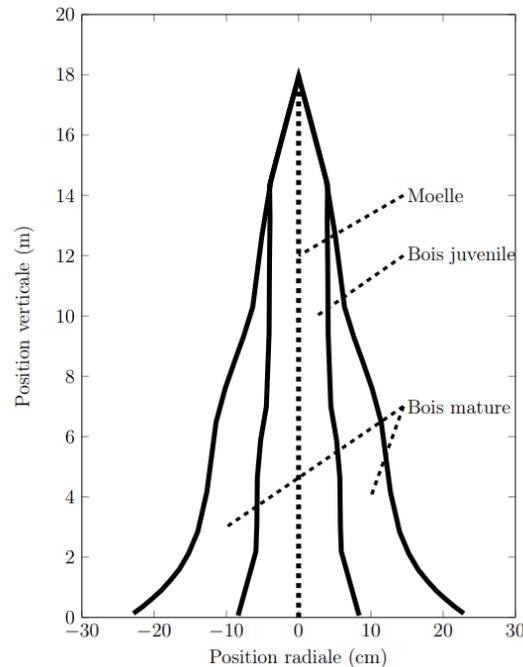


Figure 4 : Croissance d'un pin

Afin d'identifier la position de la pièce par rapport à la moëlle ainsi que la hauteur de prélèvement dans l'arbre, nous avons procédé à un tracer et un marquage systématique des éprouvettes.

Une fois les tests réalisés nous avons corrélé les propriétés mécaniques des éléments en fonction de leur écartement vis-à-vis de la moëlle et de leur hauteur dans la grume reconstituée.

b) Humidité du bois

Le bois est un matériau hygroscopique, cela signifie que selon l'ambiance en température et en humidité relative, celui-ci rejette ou absorbe de l'eau.

L'eau est présente sous deux formes dans le bois :

- L'eau libre, présente dans les lumens des cellules sous forme liquide ou vapeur,
- L'eau liée chimiquement, présente dans les parois cellulaires.

Au-dessus du PSF soit environ 30% d'humidité, les parois cellulaires sont saturées en eau et l'excédent se retrouve dans les vides cellulaires. Sous le PSF, la perte d'eau liée entraîne des déformations dimensionnelles.

Le taux d'humidité du bois impacte ses propriétés mécaniques. Un taux d'humidité élevé conduira à un amoindrissement de ces dernières.

H. J. Blass et C. Sandhass (7), ont montré l'impact des variations d'humidité sur les propriétés mécaniques du bois.

Le tableau ci-dessous exprime la diminution des propriétés mécaniques par tranche de 1% de variation d'humidité :

Propriété	Influence de l'humidité
Compression axiale	6%
Compression transversale	5%
Flexion	4%
Traction axiale	3%
Traction transversale	2%
Cisaillement	3%
Module d'élasticité	2%

Figure 5 : Impact de l'humidité sur les propriétés mécaniques.

Il est ainsi essentiel de réaliser les tests mécaniques sur des éprouvettes sèches et stabilisées. Les valeurs caractéristiques des bois sont données pour une humidité à 12%.

Il convient de faire tendre les éprouvettes vers l'humidité cible de 12% ou tout du moins de réaliser les essais avec une humidité du bois comprise entre 8% et 18% comme précisé dans la NF EN 384-A2 (8).

La même norme permet par le calcul de corriger les propriétés mécaniques de l'humidité des éprouvettes au moment du test.

A titre d'exemple, il est possible de corriger le module d'élasticité de l'élément éprouvé de la manière suivante :

$$E_0 = E_{0,u} * (1 + 0.01 * (u - u_{ref}))$$

Avec :

E_0 : module d'élasticité axial,

u : teneur en humidité au moment de l'essai ($8\% \leq u_{ref} \leq 18\%$),

u_{ref} : est la teneur en humidité de référence, soit 12%.

Le séchage des bois a constitué un élément clef de la réussite de la campagne de caractérisation mécanique.

Nous avons eu accès à une technologie de séchage convectif à basse température. Afin de conduire un cycle de séchage correct, nous nous sommes en premier lieu basés sur le guide du séchage réalisé par le FCBA (9).

Nous nous sommes tournés ensuite vers un mode de séchage plus rapide, à savoir un séchage sous vide. Nous nous sommes rapprochés du Lycée Technique Charles de Gaulle de Chaumont (52000) disposant de cette technologie.

Afin de déterminer une conduite adéquate à suivre, nous nous sommes basés sur l'article concernant le séchage sous vide rédigé par Brunner (10) ainsi que sur l'ouvrage traitant du séchage des bois tropicaux réalisé par Sales (11).

Il est par ailleurs à noter que la NF EN 384-A2 prévoit de minorer la résistance en flexion axiale des éprouvettes d'une hauteur inférieure à 150mm d'un coefficient k_h et ce dans le but que la résistance en flexion de celles-ci se rapproche d'une éprouvette d'une hauteur de 150mm.

3. Démarche d'échantillonnage

Afin de déterminer le nombre minimal d'éprouvettes à tester dans le but d'obtenir des données fiables révélatrices des propriétés mécaniques des essences qui nous sont confiées, nous nous sommes basés sur la norme ISO 3129 (12).

Celle-ci permet, en fonction de la propriété mécanique recherchée et du type de bois (résineux ou feuillus, tempérés ou exotiques) de déterminer un nombre minimal d'éprouvettes afin d'obtenir des valeurs respectant un indice de précision de 5% et un niveau de confiance de 95%.

La formule en question est la suivante :

$$n_{min} = \frac{V^2 t^2}{p^2}$$

Avec :

V : Coefficient de variation de la propriété mécanique étudiée,

t : Indice de confiance du résultat fixé à 75%,

p : Indice de précision de l'essai de 5% selon la norme,

n : Nombre minimum d'éprouvettes à tester.

4. Essais mécaniques

Le projet initial ne prévoyait pas d'essais de compression axiale, transversale, de dureté ou de retrait volumique pour le Mahogany à grandes feuilles. De la même manière les essais de portance locale n'étaient prévus que pour le Mahogany à grandes feuilles.

Par ailleurs, nous avons décidé d'augmenter le nombre d'éprouvettes à tester par essai afin que celui-ci dépasse le nombre minimal requis par la norme ISO 3129 permettant de déterminer des valeurs caractéristiques. En effet, une population plus importante d'échantillons éprouvés nous a permis de réaliser des corrélations plus fines notamment concernant le lien entre excentrement de la pièce par rapport à la moëlle et résistance mécanique.

Une valeur caractéristique permet d'émettre l'hypothèse qu'un bois classé, par exemple D24, et doté d'un module d'élasticité moyen de 10000 MPa, aura 95% de chances de présenter un module caractéristique supérieur à 8500 MPa.

Essais Essences	Flexion grandes longueurs	Portance locale	Flexion éprouvettes sans défauts	Compression axiale	Compression transversale	Dureté Monnin	Retrait volumique et masse volumique
Mahogany à grandes feuilles	23	15	23	4	9	7	6
Bois rivière	/	15	23	4	9	7	6
Gommier blanc	/	15	23	4	9	7	6
Poirier pays	/	15	23	4	9	7	6
Mahot bleu	/	15	23	4	9	7	6

Figure 6 : Echantillonnage minimal exigé selon la ISO 3129

La campagne d'essai prévoyait à l'origine le test de 560 éprouvettes avec un minimum requis par la norme ISO 3129 de 343 éprouvettes. Nous avons testé au final 1240 éprouvettes.

Essais Essences	Flexion grandes longueurs	Portance locale	Flexion éprouvettes sans défauts	Compression axiale	Compression transversale	Dureté Monnin	Retrait volumique et masse volumique
Mahogany à grandes feuilles	40	40	40	40	40	40	40
Bois rivière	/	40	40	40	40	40	40
Gommier blanc	/	40	40	40	40	40	40
Poirier pays	/	40	40	40	40	40	40
Mahot bleu	/	40	40	40	40	40	40

Figure 7 : Echantillonnage complet.

III. Reconstitution des plateaux reçus par transporteur

Après avoir décollisé l'ensemble des bois, nous avons reconstitué les planches existantes à l'aide des différents plateaux. Nous avons ensuite marqué chacun d'eux à l'aide d'une lettre et d'un chiffre en commençant par le bas des planches. Le premier plateau de la planche A est, par exemple, noté A1 et ainsi de suite.

Le but de reformer les planches s'inscrit dans une démarche visant à établir une corrélation entre la position de l'éprouvette dans la grume (hauteur, distance à la moëlle) et les différentes caractéristiques mécaniques que nous avons quantifiées lors de nos tests. Dans les différents documents issus de la littérature scientifique que nous avons pu consulter, la position du prélèvement était rarement précisée.



Figure 8 : Reconstitution d'une planche entière

IV. Palettisation du Mahogany à grandes feuilles

Nous avons procédé à la palettisation des pièces de grandes longueurs de Mahogany grandes feuilles (*Swietenia macrophylla*) afin de permettre leur séchage à l'air libre dans la halle technologique de l'ENSTIB.

L'espacement entre les lits d'avivés a été réalisé en respectant les prescriptions données dans le Guide pratique du séchage du bois réalisé par le Centre Technique du Bois et de l'Ameublement.

Epaisseur du bois (mm)	<40	40 à 65	>65
Epaisseur des baguettes (mm)	20 à 30	30 à 40	40

Figure 9 : Guide pratique du séchage du bois. CTBA

Afin de maximiser le flux d'air traversant la pile, nous avons positionné entre chaque lit des baguettes de 40mm d'épaisseur.



Figure 10 : Colisage et cerclage des pièces de grande longueur

L'humidité initiale relevée sur les bois à leur réception, à l'aide d'un humidimètre à pointes en respect de la NF EN 13183-2 (13), faisait état d'une humidité avoisinant les 35% soit au-dessus du point de saturation des fibres, point au-delà duquel la méthode résistive de détermination de l'humidité s'avère ne pas être fiable.

Les conditions d'ambiance du bâtiment relevées à l'aide d'une sonde de température et d'humidité sont les suivantes : Tsec = 16°C et HR = 43%.

Selon le graphique des isothermes de sorption du bois dans le plan température-humidité d'après Keylwerth, les conditions citées amèneront les bois à une humidité d'équilibre de 8% environ

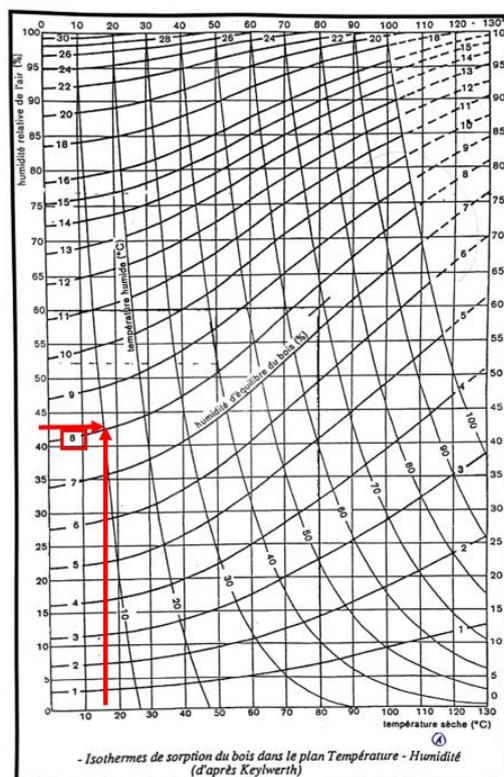


Figure 11 : Isothermes de sorption du bois dans le plan température-humidité d'après Keylwerth

Afin de réaliser les tests de caractérisation mécanique selon la NF EN 384, les éprouvettes d'essai doivent se trouver à une humidité comprise entre 7% et 18%.

Les conditions de séchage du bâtiment satisfont donc aux exigences de la norme.

Nous avons placé dans une enceinte de dessiccation régulée à 103°C un échantillon de Mahogany afin de déterminer son humidité selon la méthode donnée par la NF EN 13183-1 (14).

Après stabilisation de la masse de l'éprouvette, le calcul réalisé donnait une humidité de 16,72%, conforme aux exigences exigées par la NF EN 384.

L'humidité sur base sèche est donnée par la formule suivante :

$$X = \frac{m_H - m_o}{m_o}$$

Où :

- mh : masse humide,
- m0 : masse sèche,
- X : humidité.



Figure 12 : Epreuve ayant été soumise au séchage à 103°

V. Repérage de l'excentrement à la moëlle

Une fois tous les plateaux identifiés, nous avons procédé au tronçonnage des deux extrémités de ces derniers afin d'obtenir deux faces nettes pour faciliter l'identification des cernes et estimer la position du cœur.

Pour déterminer la distance à la moëlle de chaque éprouvette, nous avons décidé de tracer sur les faces des plateaux, la distance au cœur à l'aide d'un compas et de stylos de couleur. Afin de faciliter la démarche et l'interprétation, nous avons mis au point le code couleur suivant :

2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
22	24	26	28	30	32	34	36	38	40

Figure 13 : Code couleur exprimant la distance à la moëlle en cm

Sur les plateaux contenant le cœur (Figure 14), le traçage était relativement juste et facile, tandis que sur d'autres, nous avons été contraints de réaliser une supposition de la position du cœur en nous basant sur l'orientation des fentes de séchage, les rayons ligneux, ainsi que la forme des cernes (Figure 15).

Il est à noter que la recherche de la position de la moëlle peut-être à l'origine d'imprécisions de l'ordre de quelques millimètres.

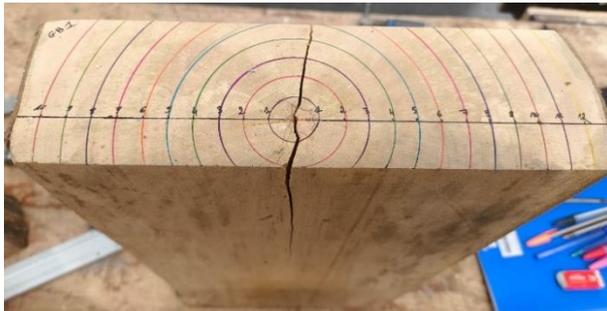


Figure 14 : Exemple de tracé de la distance à la moëlle



Figure 15 : Tracé d'une section transversale de plateau éloignée de la moëlle

Sur certains plateaux, nous avons constaté un réel écart de la position du cœur entre les deux faces. Nous avons donc pris le parti de réaliser un tracé sur chacune d'elles et d'interpoler pour trouver la distance à la moëlle de chaque éprouvette en fonction de sa position dans le plateau.

VI. Pré-débit des éprouvettes

1. Préparation des éprouvettes pour l'essai de caractérisation physique

Afin de réaliser l'essai de caractérisation physique de retrait volumique selon la NF ISO 13061-14 (15), il a été nécessaire d'usiner les éprouvettes afin que ces dernières présentent une parfaite orientation orthotopique.

A cet effet, la première étape consistait à fendre les plateaux à l'aide d'une fendeuse dans le but d'obtenir le sens longitudinal suivant parfaitement le fil du bois.

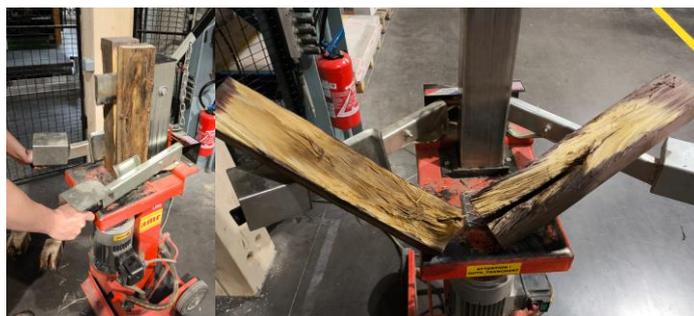


Figure 16 : Fente des bois à l'aide d'une fendeuse mobile

La deuxième étape impliquait de déligner la pièce tout en suivant autant que faire se peut le fil pour permettre par la suite le corroyage de l'élément.



Figure 17 : Délignage à l'aide d'une scie à ruban

La troisième étape est réalisée en plusieurs phases. Tout d'abord un usinage à l'aide d'une scie à format à lame inclinée afin d'obtenir une coupe radiale.



Figure 18 : Délignage avec pente

Par la suite, un dégauchissage permettant d'obtenir une coupe tangentielle.



Figure 19 : Dégauchissage

La dernière étape impliquait d'utiliser une raboteuse pour obtenir une pièce parfaitement orientée.

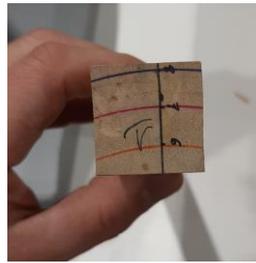


Figure 20 : Epreuve finale

Une fois le débit réalisé les éprouvettes ont été inventoriées et numérotées.



Figure 21 : Référencement des éprouvettes

2. Préparation des éprouvettes pour les essais de caractérisation mécanique

Le pré-débit des éprouvettes destinées à la caractérisation mécanique, a été conduit en tenant compte des données de retrait volumique dont nous disposons pour certaines essences. Nous avons sélectionné l'essence présentant le plus fort retrait afin d'estimer la quantité supplémentaire de matière à conserver pour permettre le corroyage futur des éprouvettes une fois celles-ci séchées.

D'après le « Tome VII : Bois de Martinique » élaboré par le Centre Technique Forestier Tropical (16), l'essence présentant le plus fort coefficient de retrait volumique est le Bois rivière (*Chimarrhis Cymosa*) pour une valeur de 0.565 ainsi qu'un point de saturation des fibres estimé à 26%.

Il est possible, grâce à ce coefficient, d'approcher la variation dimensionnelle de l'éprouvette à partir de la variation d'humidité :

$$\Delta L = r * L * \Delta X$$

Où :

- ΔL : variation dimensionnelle,
- r : coefficient de retrait,
- L : dimension de l'éprouvette.
- ΔX : variation d'humidité depuis le PSF jusqu'à l'humidité souhaitée.

Ainsi, pour une éprouvette de Bois rivière de dimension finale 20mmx20mm devant tendre vers une humidité d'équilibre finale de 8%, nous observerons la variation dimensionnelle suivante :

$$\Delta L = 0.565 * 20 * (0.26 - 0.08) = 2 \text{ mm}$$

Afin de permettre l'usinage final des éprouvettes après séchage nous avons donc ajouté une surcote totale de 10 mm soit des éprouvettes de section finie de 20mm*20mm pré-débitées à une section de 30mm*30mm.

Le même raisonnement a été appliqué aux autres sections différenciées et requises pour les essais de caractérisation mécanique.

Suivant cette démarche, les plateaux ont été désignés, chaque pièce désignée a été marquée et celles-ci ont été tronçonnées une fois leur séchage complété et le corroyage réalisé.

Nous obtenons trois types de pré-débit :

- Des pièces de section 30mm*30mm pour les essais de flexion, de compression axiale et de dureté Monin,
- Des pièces de section 175mm (longueur)* 85mm (largeur) * 35mm (épaisseur) pour les essais de portance locale,
- Des pièces de section 90mm (longueur)* 55mm (largeur) * 110mm (épaisseur) pour les essais de compression transversale.

Chaque pièce a ensuite été marquée en fonction de sa section, de son placement dans une série, et du plateau dont elle est issue.



Figure 22 : Illustration du marquage des éprouvettes

Les plateaux présentant une longueur moyenne de 600mm, il a été possible d'extraire dans une longueur désignée :

- 1 éprouvette de flexion et 1 éprouvette de compression axiale,
- Ou 5 éprouvettes de dureté Monin,
- Ou 3 éprouvettes de portance locale,
- Ou 6 éprouvettes de compression transversale.

Le tableau ci-dessous (Tableau 1) référence le nombre de pièces débitées et marquées ainsi que le nombre d'éprouvettes théoriques que nous pourrions extraire du volume usiné.

Essence	Section (mm)		
	30x30	175x85x35	90x55x110
Gommier blanc	239	46	19
Mahot bleu	69	22	25
Poirier pays	89	24	13
Bois rivière	71	26	16
Mahogany grandes feuilles	92	16	9
Nombre de pièces délignées	560	134	82
Nombre d'éprouvettes	560	402	492

Tableau 1 : Synthèse du pré-débit

La phase de préparation des éprouvettes a été achevée en date du 19/11/2024.

VII. Séchage à l'air libre des débits de faibles sections

Afin de parvenir à sécher le grand volume d'éprouvettes dont nous disposons, nous avons décidé de palettiser les pièces de section 30mm*30mm et de les soumettre à un séchage à l'air libre. L'ambiance de la halle technologique de l'école a permis d'obtenir des éprouvettes stabilisées à une humidité d'équilibre proche des 12%.



Figure 23 : Palettisation pour séchage à l'air libre

Les variations d'humidité ont été suivies ponctuellement à l'aide de la méthode dessicative par pesée.

La palettisation des éprouvettes de faible section a été achevée en date du 20/11/2024.

VIII. Séchage artificiel des fortes sections

Comme vu précédemment, les éprouvettes soumises aux essais mécaniques devaient présenter une humidité comprise entre 7% et 18% d'humidité d'équilibre.

Afin que les sections les plus importantes atteignent la fourchette d'humidité cible, nous les avons placées dans un séchoir à basse température à convection permettant un contrôle en température ainsi qu'en humidité.

Ne disposant pas de données scientifiques concernant le comportement et la réaction au séchage des essences dont nous disposons, nous avons décidé d'opter pour une conduite de séchage douce adaptée à des essences difficiles à sécher à l'image du chêne.

Cette conduite implique de suivre une table de séchage spécifique :

Humidité initiale	Température sèche (°C)	Température humide (°C)	Humidité relative (%)	Humidité d'équilibre (%)	Gradient de séchage
Vert	30	27.5	82	17	
35%	30	27	80	16	
30%	40	36.5	80	15	2
28%	45	41	77	14	2
25%	50	44	70	11.5	2.2
22%	55	48	67	11	2.2
20%	60	50	57	8.5	2.4
18%	60	47.5	50	7.5	2.4
15%	65	49	42	6	2.5

Tableau 2: Table de séchage du Chêne



Figure 24 : Disposition des éprouvettes dans le séchoir

Les éprouvettes sont disposées transversalement au flux d'air, le baguettage suit la même loi qu'énoncée en partie IV. Afin de déterminer la phase de séchage à laquelle débiter la conduite globale de ce dernier nous avons évalué l'humidité des éprouvettes à l'aide d'un humidimètre à pointes. La valeur mesurée supérieure à 89%, à défaut de nous indiquer l'humidité exacte du bois (la méthode résistive est fiable pour une humidité

du bois comprise entre 7% et 30%), nous indique cependant que celui-ci présente une humidité supérieure au point de saturation des fibres.

Il est nécessaire de réaliser en premier lieu le réchauffage du bois à faible température (<30°C), dans une atmosphère présentant une forte humidité relative (>85%). Cette étape permet d'enclencher le cycle de séchage dans des conditions propices à la préservation de la qualité des éprouvettes et ainsi d'éviter des risques de dégradation des éléments (collapses, cémentations...). Ceci s'explique par les faibles transferts hydriques ayant lieu entre l'air et le bois en raison de l'atmosphère déjà saturée en eau. Il en résulte un gradient de séchage faible (rapport de l'humidité du bois sur l'humidité d'équilibre du bois proche de 1) révélateur d'un séchage doux.

A mesure que l'humidité a diminué, nous avons augmenté la température sèche tout en diminuant l'humidité relative régnant dans l'enceinte. Ceci a eu pour conséquence d'augmenter le gradient de séchage et ainsi la vitesse de ce dernier. Les éprouvettes ont été disposées dans le séchoir en date du 21/11/2024.

Au bout de 2 semaines de séchage, malgré une diminution notable de l'humidité des bois, celle-ci se situait encore au-delà du point de saturation des fibres. A ce rythme, il aurait été nécessaire de sécher les bois durant plus de 9 semaines, rendant impossible la conduite des essais dans le temps imparti. Pour cette raison et au regard du faible volume d'accueil du séchoir convectif de l'ENSTIB (inférieure à 0.3m³ pour 0.8 m³ à sécher dans le cadre des essais), nous avons pris le parti de contacter le lycée Charles de Gaulle de Chaumont qui dispose d'un séchoir sous-vide. Les bois ont été confiés au lycée le 12/12/2024 à l'état vert et récupérés à des humidités allant de 8 à 18% en date du 14/01/2024.

Durant le séchage des sections plus importantes, nous avons procédé au corroyage et à la préparation des essais des pièces de section 30x30mm. Une fois corroyées, les éprouvettes ont été stockées au sein de la salle d'essais mécaniques du CRITT Bois contrôlée en température et humidité à 20°C et 65% HR afin que les bois tendent vers une humidité d'équilibre de 12%.



Figure 25 : De gauche à droite, les deux premières photographies montrent le séchoir sous vide du lycée avec les éprouvettes disposées sur le chariot. La troisième photographie montre les éprouvettes de 30x30mm corroyées et prêtes au tronçonnage

IX. Protocoles d'essais

1. Dispositifs d'essais et de mesure

Les essais en dimensions d'emploi ont été réalisés sur une dalle d'essais dotée d'un vérin d'une capacité de 500 kN et d'une cellule de force de 500 kN permettant d'atteindre une précision de mesure de 0.1% comme exigé dans la NF EN 408 (17).

Les essais sur éprouvettes sans défauts ont été réalisés à l'aide d'une machine d'essai universelle ZWICK Roell d'une capacité de 250 kN et les mesures ont été assurées, selon la nature des essais, à l'aide de cellules de force de 250 kN ou 10 kN dotées toutes deux d'une précision de mesure de 0.1%.

Les mesures de déplacements ont été réalisées à l'aide des outils suivants :

- Capteurs de déplacement LVDT de marque HBM dotés d'une plage de mesure de 20mm,
- Capteurs de déplacement LVDT de marque HBM dotés d'une plage de mesure de 10mm,
- Capteurs de déplacement laser de marque KEYENCE dotés d'une plage de mesure de 55mm,
- Extensomètre DigiClip de marque ZWICK Roell avec une plage de départ $l_0=55\text{mm}$.

Les capteurs de déplacement ont été étalonnés à l'aide de cales étalon de marque Mitutoyo.

L'acquisition de données est réalisée à l'aide d'une centrale d'acquisition HBM pour les essais en dimensions d'emploi et du logiciel d'acquisition ZWICK Roell pour les essais d'éprouvettes sans défauts.

Autres matériels utilisés :

- Pied à coulisse de marque Garant d'une précision de 0.01mm,
- Balance de marque PRECISA modèle XB 1200C d'une précision de 0.01g,
- Etuve pour prise d'humidité par dessiccation de marque TETHYS.

L'ensemble des capteurs et matériels ont été étalonnés par des professionnels et disposent de certificats d'étalonnage spécifiques.

2. Flexion 4 points – Grandes longueurs

Les essais en dimensions d'emploi suivent les préconisations de la NF EN 408. L'essai de flexion 4 points est réalisé à l'aide d'un vérin soutenant un chevêtre en acier auquel sont fixés deux appuis ponctuels. La barre testée repose sur deux appuis ponctuels munis de plats métalliques afin d'éviter les phénomènes de poinçonnement aux appuis liés à la compression transversale de l'éprouvette.

Les appuis périphériques et un point de blocage positionné à mi-portée du banc d'essai permettent de pallier la problématique de l'instabilité de l'éprouvette lors de l'essai à savoir, le déversement de celle-ci.

Les cotes retenues respectent les attentes de la norme et suivent la configuration suivante :

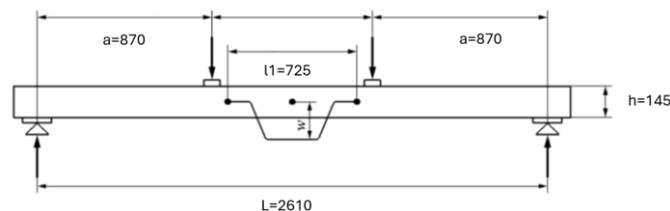


Figure 26 : Cotes du banc d'essai exprimées en mm

Un système de tringlerie métallique d'une longueur de 725mm permet de mesurer le module d'élasticité local et est calculé à partir du rayon de courbure de la poutre testée.

Le déplacement à ce niveau est mesuré à l'aide de deux LVDT de 20mm.

Le module d'élasticité global est mesuré par l'emploi de capteurs laser d'une course maximale de 55mm.

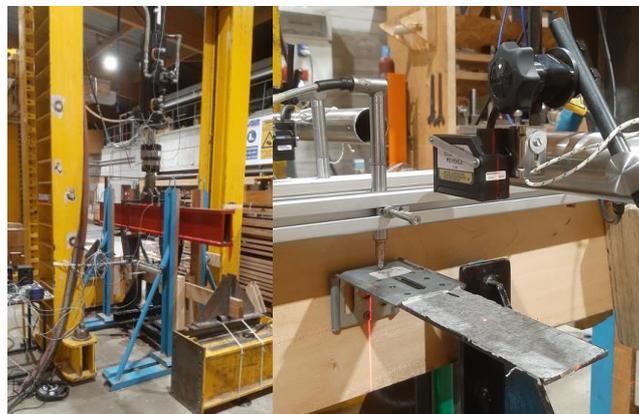


Figure 27 : Vue générale du banc d'essai et du système de mesure des déplacements local et global

3. Flexion 4 points – Eprouvettes sans défauts

Les essais de flexion 4 points suivent les préconisations de NF EN 51-016 (18) à savoir l'application des cotes suivantes :

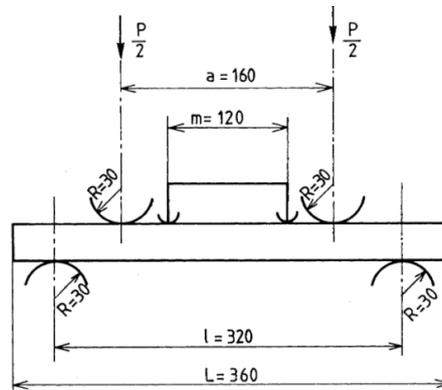


Figure 28 : Cotes du banc d'essai issu de la NF EN 51-016 exprimées en mm

Pour cet essai, seul le module local a été mesuré à l'aide d'un capteur de déplacement LVDT de 10mm ainsi que d'une pièce en acier usinée à façon pour cet essai et permettant de supporter le capteur mesurant le déplacement au niveau de la zone de moment constant. La prise de mesure au niveau de la face comprimée de l'éprouvette est conforme à la NF EN 51-016.

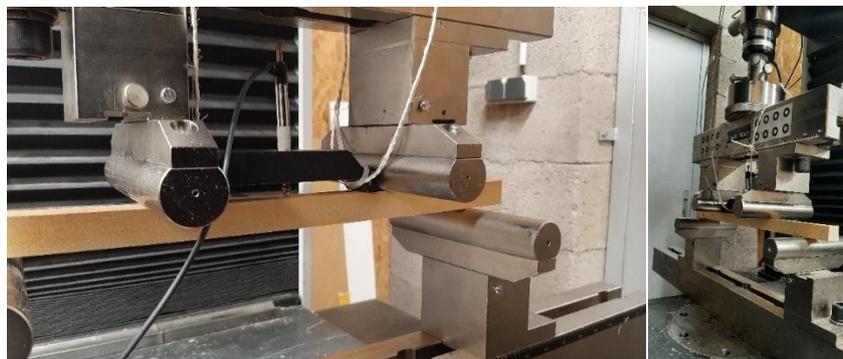


Figure 29 : Dispositif de mesure du module global et vue générale du banc d'essai

4. Compression axiale – Eprouvettes sans défauts

Les essais de compression axiale ont été réalisés conformément à la NF EN 408. Les faces comprimées des échantillons ont été rectifiées à l'aide d'une machine à commande numérique afin d'être parfaitement parallèles entre elles.



Figure 30 : Gabarit de rectification de faces et échantillons avant et après rectification de la longueur par machine à commande numérique

Le module d'élasticité axiale a été mesuré à l'aide d'un extensomètre doté d'une longueur de référence de 55mm et d'une précision de mesure de 0.5 μm .



Figure 31 : Banc d'essai de compression axiale avec capteur de prise du module d'élasticité

5. Compression transversale – Eprouvettes sans défauts

L'essai a été réalisé encore une fois en conformité avec la NF EN 408. Les échantillons sont sollicités en compression transversale selon un montage se rapprochant de celui de compression axiale à l'aide de plateaux de compression. Le module d'élasticité transversal est calculé en tenant compte de la propre raideur de la machine d'essai.



Figure 32 : Banc d'essai de compression transversale et rupture type d'une éprouvette sollicitée de la sorte

6. Portance locale – Epreuves sans défauts

Les essais de portances locales axiale et transversale ont été réalisés conformément à la NF EN 383 au moyen d'une broche en acier de 12mm.

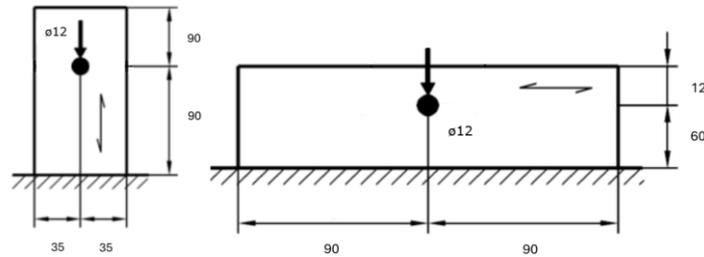


Figure 33 : Pinces pour les essais de portances locales

Les éprouvettes ont été percées en séries à l'aide d'un montage d'usinage et d'une machine à commande numérique dans le but d'obtenir une parfaite transversalité de perçage.



Figure 34 : Perçage des éprouvettes de portance à l'aide d'une machine à commande numérique.

Les essais de portance ont été réalisés à l'aide d'un plateau de compression ainsi que d'un montage d'essai spécifique. Les déplacements sont mesurés à l'aide de deux LVDT de 20mm.



Figure 35 : Banc d'essai de portance locale axiale

Le cycle de chargement suivant, exprimé en secondes, a également été respecté, conformément à la norme NF EN 383 :

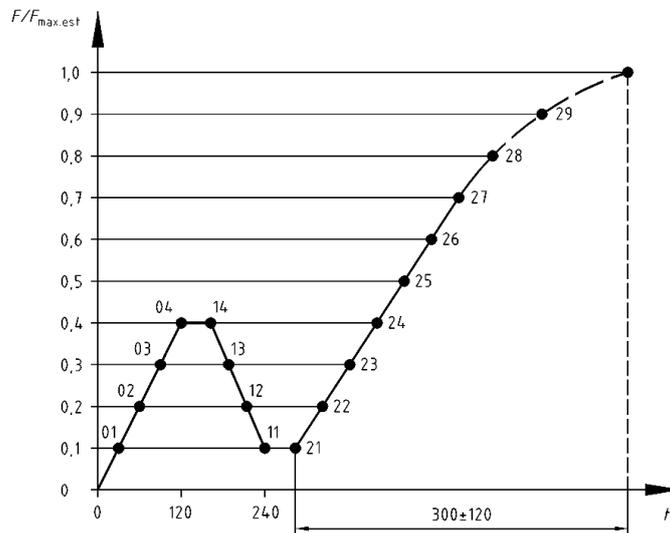


Figure 36 : Cycle de chargement essai de portance locale

7. Dureté Monnin – Eprouvettes sans défauts

Les essais de dureté Monnin ont été réalisés selon la norme NF B51-013 (19). Un montage de flexion 1 point rotulé muni d'un cylindre en acier de diamètre 30mm, permettait d'imprimer sur l'éprouvette une marque laissée par un papier carbone interposé entre l'éprouvette d'essai et le cylindre.

L'empreinte a ensuite été mesurée à l'aide d'un pied à coulisse numérique et d'un stéréomicroscope.



Figure 37 : Banc d'essai de dureté Monnin et mesure de l'empreinte.

8. Essais de retrait volumique

Les essais de retrait volumique ont été réalisés selon la norme NF ISO 13061-14 en suivant la méthode stéréométrique. Les éprouvettes ont été immergées dans l'eau pendant 2 mois afin d'assurer un état de saturation pour les mesures initiales.



Figure 38 : Immersion des éprouvettes afin d'assurer l'état de saturation des bois

Les dimensions et masses des éprouvettes ont été relevées à l'aide d'un pied à coulisse numérique et d'une balance. Sur chacune des essences, 4 relevés dimensionnels et massiques ont été réalisés, l'un à l'état parfaitement saturé, l'un aux alentours de 30% d'humidité, l'un aux alentours de 10% d'humidité, et un dernier à l'état parfaitement sec. L'état parfaitement sec a été atteint grâce à une étuve à convection forcée stabilisée à 103 +/- 2°C.



Figure 39 : Séchage des éprouvettes à l'étuve et relevé dimensionnel au pied à coulisse.

9. Synthèse des échantillons à éprouver

Essai	Nombre	Largeur l (mm)	Hauteur h (mm)	Longueur L (mm)
Flexion 4 points - Grandes longueurs*	40	45	145	2610
Flexion 4 points - Eprouvettes sans défauts	200	20	20	360
Compression axiale - Eprouvettes sans défauts	200	20	20	135
Compression transversale - Eprouvettes sans défauts	200	45	95	70
Portance locale - Eprouvettes sans défauts	200	28	72	180
Dureté Monnin - Eprouvettes sans défauts	200	20	20	100
Retrait volumique	200	20	20	20
Total	1240			

Tableau 3 : Récapitulatif des échantillons à tester

*Seul le Mahogany grandes feuilles a été testé en dimensions d'emploi.

X. Utilisation des mesures relevées dans la détermination des propriétés physiques et mécaniques des essences étudiées

1. Module d'élasticité local en flexion axiale

Le module d'élasticité local est déterminé à partir du déplacement des capteurs positionnés au niveau de la portion de moment constant ou pur de l'éprouvette c'est-à-dire en l'absence d'effort tranchant sur cette partie contrainte. La norme NF EN 384 précise que le module d'élasticité en flexion comme déclaré dans la NF EN 338 (20) correspond au module d'élasticité local.

Selon la NF EN 408, le module local est calculé comme suit :

$$E_{m,l} = \frac{al_1^2(F_2 - F_1)}{16I(w_2 - w_1)}$$

Avec :

$E_{m,l}$: Module d'élasticité local (MPa),

a : Distance entre un point de chargement et l'appui le plus proche (mm),

l_1 : Longueur de base pour la détermination du module d'élasticité (mm),

$F_2 - F_1$: Accroissement de force en newtons sur la ligne de régression avec un coefficient de 0.99 ou mieux (N),

I : Moment quadratique de l'élément $\frac{bh^3}{12}$ (mm⁴),

$w_2 - w_1$: Accroissement de flèche en millimètre correspondant à $F_2 - F_1$ (mm).

Une autre manière de calculer le module local consiste à utiliser le théorème de Pythagore et le moment de flexion constant entre les deux points de chargement :

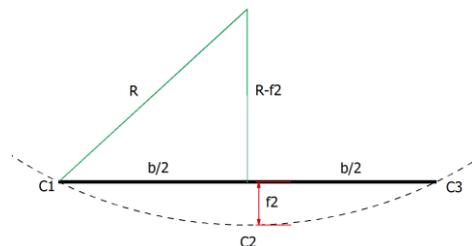


Figure 40 : Schéma du rayon de courbure

$$R(R - f_2)^2 + b^2 = R^2 ; R \approx \frac{b^2}{2f_2}$$

$$m_{f_2} = \frac{EI}{R}$$

$$\frac{F}{2} l_1 = \frac{EI 2f_2}{b^2}$$

$$E = \frac{F b^2 l_1}{4I f_2}$$

Avec :

f_2 : flèche locale (mm)

2. Module d'élasticité global en flexion axiale

Le module d'élasticité global est mesuré à l'aide de capteurs positionnés à mi-portée de la pièce éprouvée mais non solidaires de celle-ci, contrairement à ceux permettant de mesurer le module local.

Selon la NF EN 408, le module global est calculé comme suit :

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gbh} \right)}$$

Afin de déterminer le module d'élasticité global, il convient de calculer le module de cisaillement G. Pour ce faire, nous calculons tout d'abord une valeur de module moyenne en supposant G infini :

$$E_{m,g,G=\infty,mean} = \frac{3al^2 - 4a^3}{4bh^3 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1}}$$

Puis en croisant les formules proposées par la norme nous obtenons le module de cisaillement à injecter dans la première équation permettant de calculer le module global :

$$G = \frac{12h^2}{(15l^2 - 20a^2) \left(\frac{1}{E_{m,g,G=\infty,mean}} - \frac{1}{E_{m,l,mean}} \right)}$$

Avec :

$E_{m,g}$: Module d'élasticité global (MPa),

a : Distance entre un point de chargement et l'appui le plus proche (mm),

f : Portée en flexion (mm),

$F_2 - F_1$: Accroissement de force en newtons sur la ligne de régression avec un coefficient de 0.99 ou mieux (mm),

I : Moment quadratique de l'élément $\frac{bh^3}{12}$ (mm⁴),

$w_2 - w_1$: Accroissement de flèche en millimètre correspondant à $F_2 - F_1$ (mm).

3. Module d'élasticité en compression axiale

Selon la NF EN 408, le module d'élasticité en compression axiale est donné par la formule suivante :

$$E_{c,0} = \frac{l_1(F_2 - F_1)}{A(w_2 - w_1)}$$

Avec

$E_{c,0}$: Module d'élasticité en compression axiale (MPa),

l_1 : Longueur de base pour la détermination du module d'élasticité (mm),

$F_2 - F_1$: Accroissement de force en newtons sur la ligne de régression avec un coefficient de 0.99 ou mieux (N),

A : Surface comprimée de l'éprouvette (mm²),

$w_2 - w_1$: Accroissement de flèche en millimètre correspondant à $F_2 - F_1$ (mm).

4. Module d'élasticité en compression transversale

Selon la NF EN 408, le module d'élasticité transversal calculé en compression transversale est donné par la formule suivante :

$$E_{c,90} = \frac{h(F_{40} - F_{10})}{A(w_{40} - w_{10})}$$

Avec :

$E_{c,90}$: Module d'élasticité en compression transversale (MPa),

h : Hauteur de l'éprouvette (mm),

$F_{40} - F_{10}$: Accroissement de force sur la partie linéaire de la courbe force/déplacement (N). F_{10} doit être 10% et F_{40} , 40% de $F_{c,90,max}$,

A : Surface comprimée de l'éprouvette (mm²),

$w_2 - w_1$: Accroissement de flèche en millimètre correspondant à $F_{40} - F_{10}$ (mm).

La détermination de $F_{c,90,max}$ doit suivre le protocole itératif suivant donné dans la norme NF EN 408 :

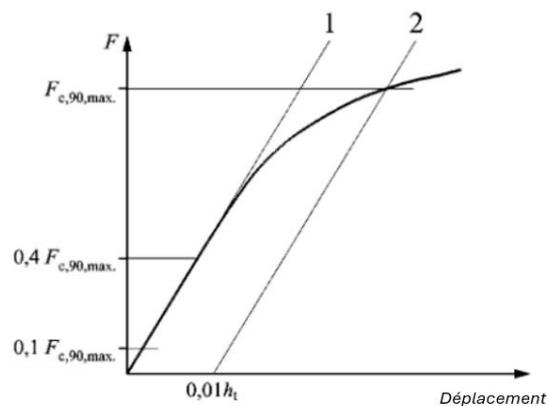


Figure 41 : Courbe d'essai force/déplacement

Il est nécessaire en premier lieu d'approximer une valeur pour la charge maximale $F_{c,90,max,est}$. Sur la courbe de résultat d'essai force/flèche, il convient de calculer F_{40} et F_{10} et de déterminer où ces deux valeurs interceptent la courbe d'essai. Il est ensuite nécessaire de tracer la droite 1 passant par ces deux points puis la droite 2 ayant son origine en $F=0$ parallèlement à la droite 1 mais déportée de celle-ci en abscisse à une distance équivalente de $0,01h$.

L'intersection de la droite 2 avec la courbe d'essai donne $F_{c,90,max}$. Si la valeur $F_{c,90,max}$ déterminée de cette manière se trouve dans un intervalle de 5% de $F_{c,90,max,est}$ alors cette valeur pourra être utilisée pour déterminer la résistance en compression transversale ou le module d'élasticité transversal. Dans le cas le contraire, il sera nécessaire de répéter l'opération en prenant $F_{c,90,max,est}$ égal à $F_{c,90,max}$ calculé précédemment par la méthode citée plus-avant.

5. Calcul de la résistance en flexion axiale

Selon la NF EN 408, la résistance en flexion est calculée de la manière suivante :

$$f_m = \frac{3Fa}{bh^2}$$

f_m : Résistance en flexion (MPa),

F : Force maximale atteinte lors de l'essai (N),

a : Distance entre un point de chargement et l'appui le plus proche (mm),

b : Base de l'éprouvette (mm),

h : Hauteur de l'éprouvette (mm).

6. Calcul de la résistance en compression axiale

Selon la NF EN 408, la résistance en compression axiale est calculée de la manière suivante :

$$f_{c,0} = \frac{F_{max}}{A}$$

Avec :

$f_{c,0}$: Résistance en compression axiale (MPa),

F_{max} : Force maximale atteinte lors de l'essai (N),

A : Surface comprimée de l'éprouvette (mm²).

7. Calcul de la résistance en compression transversale

Selon la NF EN 408, La résistance en compression transversale est calculée de la manière suivante :

$$f_{c,90} = \frac{F_{c,90,max}}{A}$$

Avec :

$f_{c,90}$: Résistance en compression transversale (MPa),

$F_{c,90,max}$: Force maximale calculée selon la méthode évoquée en §4(N),

A : Surface comprimée de l'éprouvette (mm²).

8. Calcul des propriétés de portance locale

Selon la NF EN 383, la valeur de portance locale est calculée de la manière suivante :

$$f_{h,5mm} = \frac{F_{5mm}}{d \cdot t}$$

Avec :

F_{5mm} : Elle s'obtient soit à partir de la force maximale atteinte lors de l'essai si l'enfoncement n'atteint pas les 5mm, soit à partir de la fonction K_{pl} en fixant $x=5mm$,

d : Diamètre de la broche, dans notre cas, 12mm,

t : Épaisseur des éprouvettes, dans notre cas, 28mm,

K_{pl} : Raideur de fondation plastique entre 2.5mm d'enfoncement et la fin de l'essai obtenue par régression linéaire entre ces deux bornes (MPa/mm).

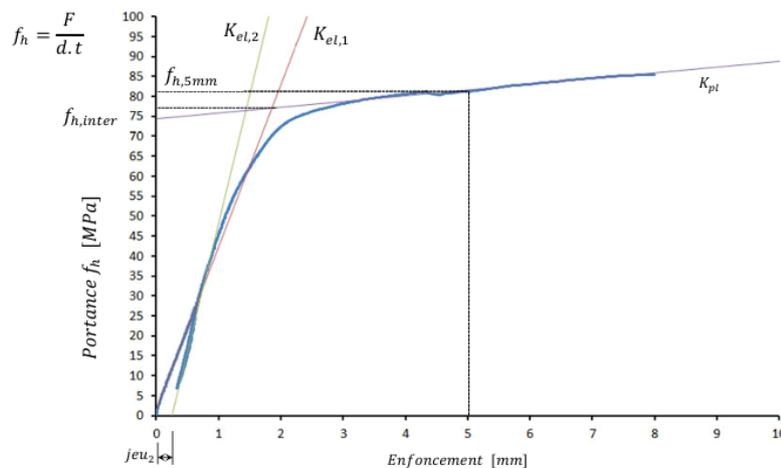


Figure 42 : Courbe type d'un essai d'enfoncement. Graphique issu de la thèse de Thibault Benistand (21)

9. Calcul des propriétés de retrait volumique

Le calcul du retrait volumique total β_v est calculé en pourcentage selon la formule suivante issue de la NF EN 13061-14:

$$\beta_v = \frac{(l_{r1} * l_{t1}) - (l_{r2} * l_{t2})}{(l_{r1} * l_{t1})} * 100$$

Avec :

l_{r1} : Dimension dans le sens radial de l'éprouvette, à l'état complètement saturé (mm),

l_{t1} : Dimension dans le sens tangentiel de l'éprouvette, à l'état complètement saturé (mm),

l_{r2} : Dimension dans le sens radial de l'éprouvette, à l'état parfaitement sec (mm),

l_{t2} : Dimension dans le sens tangentiel de l'éprouvette, à l'état parfaitement sec (mm),

Les retraits longitudinal, radial et tangentiel sont calculés avec la formule suivante :

$$R_i = \frac{\text{Longueur}_i(\text{état saturé}) - \text{Longueur}_i(\text{état anhydre})}{\text{Longueur}_i(\text{état saturé})}$$

10. Calcul de la dureté Monnin

La flèche de pénétration est déterminée de la manière suivante selon la NF B51-013 :

$$t = 15 - \frac{1}{2} \sqrt{900 - a^2}$$

Avec :

a : Largeur d'empreinte (mm).

Le chiffre de dureté Monnin, N , adimensionnel, est égal à l'inverse de la flèche de pénétration :

$$N = \frac{1}{t}$$

Le chiffre de dureté Monnin d'un lot d'éprouvettes est égal à la moyenne arithmétique arrondie des duretés obtenues sur chaque éprouvette.

11. Calcul de la masse volumique

La masse volumique est déterminée la manière suivante :

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Avec :

ρ : masse volumique de l'éprouvette (kg/m^3),

m : masse de l'éprouvette (kg),

V : volume de l'éprouvette (m^3).

XI. Correction des valeurs calculées et détermination des valeurs caractéristiques

1. Correction des caractéristiques physiques et mécaniques

La norme NF EN 384 impose de corriger les propriétés mécaniques et physiques des bois selon leur humidité, qui doit être comprise entre 8 et 18%, afin que celles-ci tendent vers une humidité de référence de 12%.

La norme prévoit de corriger la masse volumique, le module d'élasticité axial ainsi que la résistance en compression axiale selon les formules suivantes :

$$\rho = \rho(1 - 0.005(u - u_{ref}))$$

$$E_0 = E_{0,u}(1 + 0.01(u - u_{ref}))$$

$$f_{c,0} = f_{c,0,u}(1 + 0.03(u - u_{ref}))$$

Avec :

ρ : masse volumique de l'éprouvette (kg/m^3),

E_0 : module d'élasticité axiale (MPa),

$f_{c,0}$: résistance en compression axiale (MPa),

u : teneur en humidité de l'éprouvette au moment de l'essai comprise entre 8 et 18%,

u_{ref} : teneur en humidité de référence définie à 12%.

La norme permet de corriger les propriétés axiales seulement. Cependant, la littérature scientifique relative à la mécanique du bois met en avant l'impact de l'humidité sur l'ensemble des propriétés mécaniques qu'elles soient axiales ou transverses. Ainsi, nous avons donc procédé à la correction de l'ensemble des propriétés en fonction de l'humidité.

Par ailleurs, les coefficients rectificatifs proposés par la norme sont adaptés à des essences provenant des régions tempérées.

Toujours selon la NF EN 384, il convient de corriger les caractéristiques mécaniques pour les éléments testés en flexion ainsi qu'en traction dont la hauteur est inférieure à 150mm et la masse volumique inférieure à 700 kg/m³ selon la formule suivante :

$$k_h = \text{Min} \left\{ \left(\frac{150}{h} \right)^{0.2} \right. \\ \left. 1.3 \right\}$$

Avec :

h : hauteur de l'éprouvette en mm.

Il est à noter que ce coefficient ne s'applique que pour les éléments testés en dimensions d'emploi et ce afin de prendre en compte la présence de singularités dans le bois, à l'image des nœuds et fentes, présents en plus grand nombre à mesure que la hauteur de l'élément augmente.

Les éprouvettes dites « sans défauts » tendent à mettre en avant les propriétés intrinsèques du bois exempt de toute singularité.

2. Calcul des valeurs caractéristiques

La norme NF EN 14358 (22) prévoit de déterminer les propriétés mécaniques et physiques des éléments testés dans un intervalle de confiance α de 75% avec une exclusion au fractile à 5%. Cela signifie que 95% des propriétés mécaniques d'une même essence seront supérieures à la valeur caractéristique calculée. La norme prévoit également de déterminer une résistance caractéristique moyenne.

Dans le cas de l'étude de caractéristiques mécanique et physique d'éléments provenant d'une population homogène et dont les propriétés suivent une loi normale ou log-normale, il est permis d'utiliser une méthode paramétrique de détermination des valeurs caractéristiques.

Les modules d'élasticité ainsi que les masses volumiques sont réputés suivre une loi normale et les résistances une loi log-normale.

Il est tout d'abord nécessaire de déterminer la valeur moyenne \bar{y} ainsi que l'écart-type s_y de la manière suivante :

Avec une distribution log-normale	Avec une distribution normale
$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln m_i$	$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i$
$\bar{y} = \max \left\{ \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln m_i - \bar{y})^2}, 0.05 \right.$	$\bar{y} = \max \left\{ \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{y})^2}, 0.05 \right.$

Il est ensuite nécessaire de calculer le coefficient $k_s(n)$ donnant la limite inférieure pour $\alpha = 75\%$ et $p = 5\%$, de la façon simplifiée suivante :

$$k_s(n) = \frac{6.5n + 6}{3.7n - 3}$$

Ainsi, la valeur caractéristique de l'échantillon est calculée de la sorte :

Fractile	Avec une distribution log-normale	Avec une distribution normale
5-percentile	$m_k = \exp(\bar{y} - k_s(n)s_y)$	$m_k = \bar{y} - k_s(n)s_y$

Le calcul de la valeur caractéristique moyenne suit le même cheminement que celui décrit ci-dessus à la seule différence de l'application d'un coefficient $k_s(n)$ différent et calculé ainsi :

$$k_s(n) = \frac{0.78}{n^{0.53}}$$

XII. Résultats expérimentaux

1. Vérification des valeurs moyennes

Selon la NF EN 14358, les valeurs moyennes doivent satisfaire à l'exigence du risque producteur α de 5% et du risque consommateur β de 10%.

Pour ce faire il est nécessaire que le coefficient de variabilité (COV) soit compris entre certaines bornes selon la propriété étudiée.

Dans le cadre de la vérification des valeurs moyennes, pour une population n , il sera nécessaire que le COV de nos essais soit compris entre 20 et 25%.

Concernant la vérification des valeurs à 5% d'exclusion, il sera nécessaire que le COV soit situé entre 25 et 30%.

Un coefficient de variabilité supérieur à 35%, aurait impliqué l'augmentation de la taille de l'échantillon testé.

En l'espèce, l'ensemble de nos essais font état d'un COV inférieur à 35% en toutes circonstances.

Un faible COV induit une bonne homogénéité de propriété de l'échantillon de population testée.

En raison de résultats incohérents, observés lors de la sollicitation mécanique de certaines éprouvettes, liés à la persistance de défauts et singularités, ces dernières ont été retirées expliquant ainsi par endroits un nombre d'éprouvettes testées parfois inférieur à 40 pièces mais ce de manière marginale.

Pour finir, nous avons cité plus avant le fait que les résistances étaient réputées suivre une loi log-normale, cependant, en vérifiant nos séries statistiques par la réalisation de plusieurs tests de normalité et l'utilisation de di

vers outils statistiques (test du χ^2 , test de Shapiro-Wilk, répartition de la population, coefficient d'asymétrie, droite de Henry, boîtes à moustaches...), nous avons constaté que l'ensemble des résistances des essences testées pour chaque sollicitation suivaient une loi normale. Nous avons donc appliqué les calculs associés à ce type de loi.



Figure 43 : Eprouvettes supprimées du dépouillement en raison de singularités, ici des nœuds, ayant conduit à une rupture prématurée lors des essais

2. Résultats des essais de flexion 4 points – Eprouvettes en dimensions d’emploi

Pour le tableau ci-dessous ainsi que les suivants la terminologie est la suivante :

- Moy. : moyenne,
- COV : coefficient de variabilité,
- kmean : valeur caractéristique moyenne,
- k : valeur caractéristique.

Essence	Nombre	Module d'élasticité local MOEL (MPa)				Module d'élasticité global MOEg (MPa)				Résistance MOR (MPa)			
		Moy.	COV	kmean	k	Moy.	COV	kmean	k	Moy.	COV	kmean	k
Mahogany grandes feuilles	40	10483	8,28%	10386	8889	10471	7.13%	10386	9100	58	23,70%	54,47	33

Tableau 4 : Synthèse des résultats d'essais - Flexion 4 points sur éprouvettes en dimensions d'emploi.

3. Résultats des essais de flexion 4 points – Eprouvettes sans défauts

Essence	Nombre	Module d'élasticité MOE (MPa)				Résistance MOR (MPa)			
		Moy.	COV	kmean	k	Moy.	COV	kmean	k
Bois rivière	46	11696	17,16%	11490	8036	81	25,33%	79	43
Gommier blanc	40	12411	14,70%	12209	9064	75	27,42%	73	37
Mahogany	48	9827	11,81%	9711	7713	78	18,29%	77	52
Poirier pays	45	9621	10,96%	9510	7694	78	20,14%	77	50
Mahot bleu	43	10654	9,47%	10547	8809	105	15,32%	104	76
Total	222								

Tableau 5 : Synthèse des résultats - Flexion 4 points des éprouvettes sans défauts.

4. Résultats des essais de compression axiale – Eprouvettes sans défauts

Essence	Nombre	Module d'élasticité MOE (MPa)				Résistance MOR (MPa)				Masse volumique (kg/m ³)			
		Moy.	COV	kmean	k	Moy.	COV	kmean	k	Moy.	COV	kmean	k
Bois rivière	48	11051	17,17%	10861	7595	54	10,46%	54	44	701	4,06%	698	649
Gommier blanc	36	11407	19,86%	11143	7230	48	10,09%	47	39	626	9,19%	619	520
Mahogany grandes feuilles	52	8550	14,22%	8433	6343	41	12,70%	40	32	518	9,56%	513	428
Poirier pays	40	8226	12,96%	8108	6270	46	8,71%	45	39	558	9,14%	552	464
Mahot bleu	45	9785	10,87%	9674	7843	50	6,24%	50	45	680	4,91%	677	619
Total	221												

Tableau 6 : Synthèse des résultats - Compression axiale des éprouvettes sans défauts.

5. Résultats des essais de compression transversale – Eprouvettes sans défauts

Essence	Nombre	Module d'élasticité MOE (MPa)				Résistance MOR (MPa)			
		Moy.	COV	kmean	k	Moy.	COV	kmean	k
Bois rivière	41	1669	20,07%	1633	1055	19,7	16,95%	19,3	13,6
Gommier blanc	40	832	17,22%	816	569	9,7	14,77%	9,5	7,1
Mahogany grandes feuilles	40	893	35,04%	858	319	10,0	29,85%	9,7	4,5
Poirier pays	40	749	17,44%	735	509	9,3	14,31%	9,2	6,9
Mahot bleu	36	1504	15,37%	1477	1078	16,2	15,36%	15,9	11,6
Total	197								

Tableau 7 : Synthèse des résultats - Compression transversale des éprouvettes sans défauts.

6. Résultats des essais de Dureté Monnin – Eprouvettes sans défauts

	Nombre	Moyenne empreinte a (mm)	COV	Chiffre de dureté Monnin N	Equivalence de dureté
Bois rivière	39	4,96	15,39%	5,19	Bois mi-dur
Gommier blanc	38	6,07	13,09%	3,38	Bois mi-dur
Mahogany	41	6,67	17,65%	2,91	Bois tendre
Poirier pays	40	6,20	10,85%	3,20	Bois mi-dur
Mahot bleu	40	4,81	12,01%	5,38	Bois mi-dur
Total	198				

Tableau 8 : Synthèse des résultats - Dureté Monnin - Eprouvettes sans défauts.

Echelle de dureté Monnin	
Bois très tendre	N<1,5
Bois tendre	1,5<N<3
Bois mi-dur	3<N<6
Bois dur	6<N<9
Bois très dur	N>9

Tableau 9 : Echelle de dureté Monnin.

7. Résultats des essais de portance locale – Eprouvettes sans défauts

c) Portance locale parallèle au fil

Essence	Nombre	Portance locale $f_{0,h,5mm}$ (MPa)				Masse volumique (kg/m ³)			
		Moy.	COV	kmean	k	Moy.	COV	kmean	k
Bois Rivière	20	74,56	12,28%	73,10	57,02	700,49	6,10%	693,68	618,68
Gommier Blanc	20	51,74	9,01%	51,00	42,81	647,87	5,80%	641,88	575,94
Mahogany	20	43,16	13,04%	42,27	32,38	504,31	4,36%	500,81	462,21
Poirier Pays	20	47,72	10,42%	46,93	38,19	585,81	5,48%	580,69	524,30
Mahot Bleu	20	74,21	7,48%	73,33	63,58	729,86	3,32%	725,99	683,38
Total	100								

Tableau 10 : Synthèse des résultats – Portance locale parallèle au fil – éprouvettes sans défauts

d) Portance locale perpendiculaire au fil

Essence	Nombre	Portance locale $f_{90,h,5mm}$ (MPa)				Masse volumique (kg/m ³)			
		Moy.	COV	kmean	k	Moy.	COV	kmean	k
Bois Rivière	20	61,78	14,45%	60,36	44,68	700,49	6,10%	693,68	618,68
Gommier Blanc	19	46,55	11,58%	45,69	36,23	647,87	5,80%	641,88	575,94
Mahogany	20	30,59	19,53%	29,64	19,15	504,31	4,36%	500,81	462,21
Poirier Pays	20	44,59	11,34%	43,78	34,90	585,81	5,48%	580,69	524,30
Mahot Bleu	20	70,09	7,85%	69,22	59,55	729,86	3,32%	725,99	683,38
Total	99								

Tableau 11 : Synthèse des résultats – Portance locale perpendiculaire au fil – éprouvettes sans défauts

8. Résultats des essais de détermination du retrait volumique – Eprouvettes sans défauts

Bois Rivière	Retraits	Longitudinal (%)	Radial (%)	Tangentiel (%)	Retrait volumique total	Masse volumique anhydre
	Moyenne	0,5	4,2	6,9	10,8	648,1
	Ecart type	0,3	0,4	0,5	0,5	26,2
	COV	56,25	10,01	7,21	4,69	4%

Gommier Blanc	Retraits	Longitudinal (%)	Radial (%)	Tangentiel (%)	Retrait volumique total	Masse volumique anhydre
	Moyenne	0,5	3,5	6,8	10,0	581,3
	Ecart type	0,1	0,3	0,6	0,7	22,4
	COV	25,31	8,61	8,16	6,99	4%

Mahogany	Retraits	Longitudinal (%)	Radial (%)	Tangentiel (%)	Retrait volumique total	Masse volumique anhydre
	Moyenne	0,3	3,4	5,4	8,6	515,7
	Ecart type	0,2	0,4	0,5	0,6	36,4
	COV	78,40	10,71	8,99	6,73	7%

Poirier Pays	Retraits	Longitudinal (%)	Radial (%)	Tangentiel (%)	Retrait volumique total	Masse volumique anhydre
	Moyenne	0,6	4,3	4,9	9,0	520,8
	Ecart type	0,2	0,2	0,5	0,6	31,3
	COV	31,23	5,70	9,80	6,20	6%

Mahot Bleu	Retraits	Longitudinal (%)	Radial (%)	Tangentiel (%)	Retrait volumique total	Masse volumique anhydre
	Moyenne	0,4	4,9	7,0	11,6	716,3
	Ecart type	0,3	0,3	0,6	0,7	42,1
	COV	72,37	6,02	8,02	5,94	6%

Tableau 12 : Synthèse des résultats – Retraits volumiques – Eprouvettes sans défauts

Essence	Retraits						Masse volumique
	Longitudinal (%)	Radial (%)	Tangentiel (%)	Volumique total	Ratio RT/RR	Coefficient de rétractibilité (%/%humidité)	Masse volumique anhydre
Bois Rivière	0,5	4,2	6,9	10,8	1,7	0,42%	648
Gommier Blanc	0,5	3,5	6,8	10,0	1,9	0,55%	581
Mahogany	0,3	3,4	5,4	8,6	1,6	0,27%	516
Poirier Pays	0,6	4,3	4,9	9,0	1,2	0,41%	521
Mahot Bleu	0,4	4,9	7,0	11,6	1,4	0,65%	716

Tableau 13 : Synthèse des résultats - Retraits et coefficient de variation volumique - éprouvettes sans défauts

XIII. Analyse des résultats, observations et corrélations possibles

1. Analyse des résultats

Au vu des masses volumiques moyennes des essences étudiées allant de 512 à 698 kg/m³ (Figure 44) les propriétés mécaniques seront comparées à celles des feuillus et plus spécifiquement aux classes de résistance mécanique D24 et D30 comme définies par la norme NF EN 338.

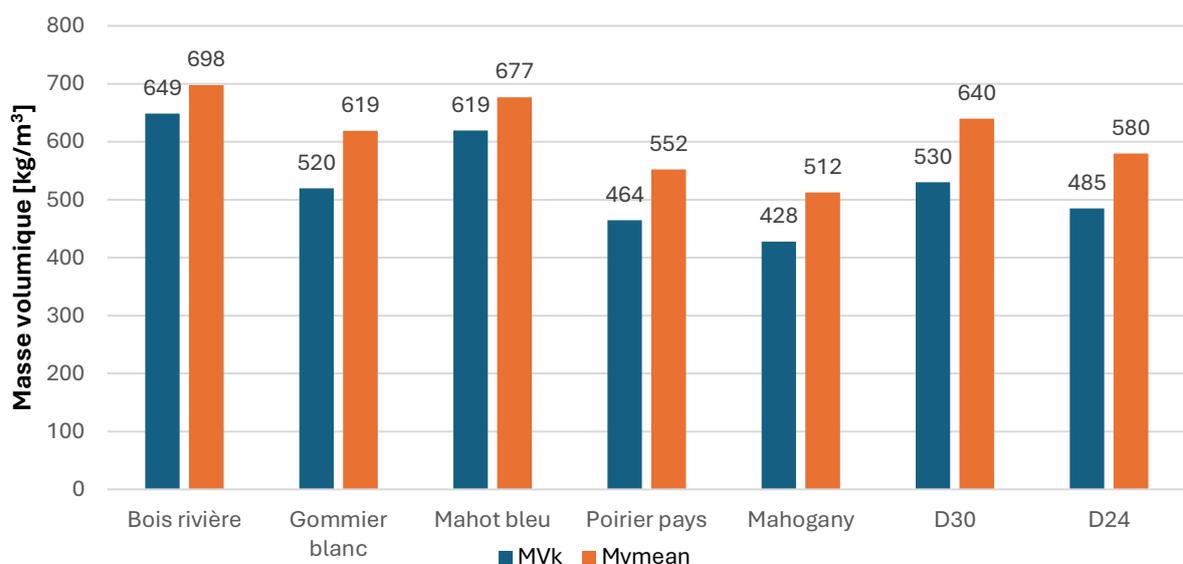


Figure 44 : CoMParatif des masses volumiques des essences caractérisées avec le D24 et D30.

Nous remarquons que les valeurs de résistances des essences exotiques déterminées par essais, f_{mk} , $f_{c,0,k}$, $f_{c,90,k}$, sont supérieures aux valeurs de résistance des classes D24 et 30 (Figure 45).

Le Mahot bleu présente la résistance en flexion f_{mk} la plus importante et significative à 76 MPa, contre 24 MPa pour le D24 et 30 MPa pour le D30 et une moyenne de 46 MPa pour les autres essences exotiques testées.

Les résistances en compression axiale sont relativement homogènes allant de 32 MPa pour le Mahogany à grandes feuilles à 45 MPa pour le Mahot bleu contre 21 MPa pour le D24 et 24 MPa pour le D30.

On remarque une plus grande disparité au niveau des résistances en compression transversale, le Mahogany grandes feuilles, le Poirier pays, le Gommier blanc présentent des résistances respectivement de 4.5, 6.9 et 7,1 MPa lorsque le Mahot bleu et le Bois rivière affichent des résistances de 11.6 et 13.6 MPa contre 5 MPa pour le D30.

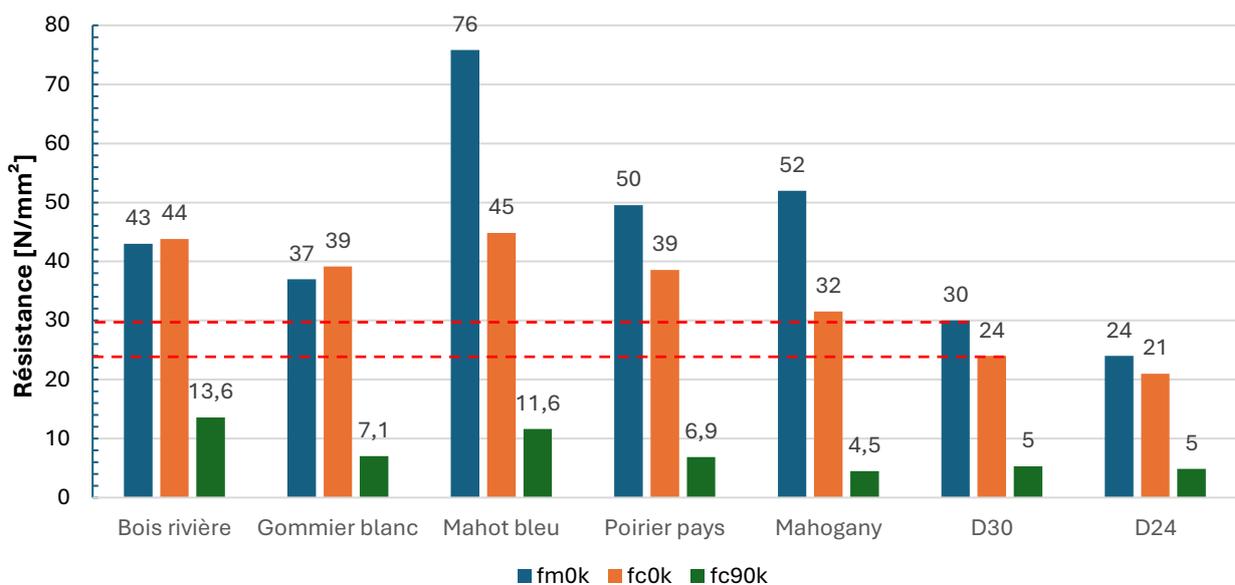


Figure 45 : Résistances caractéristiques des essences testées comparées à celles du D30.

Concernant les modules d'élasticité axiale moyens, seuls le Bois rivière et le Gommier blanc présentent des modules d'élasticité moyens en flexion axiale, $E_{m,0,mean}$, supérieurs au D30 avec respectivement 11490 et 12209 MPa, contre 11000 MPa pour le D30. Le Mahot bleu, le Poirier pays, le Mahogany font état de modules moyens de 10547, 9510 et 9711 MPa (Figure 46).

Concernant les valeurs caractéristiques des modules d'élasticité axiale, aucune des essences étudiées ne dispose d'un module supérieur au D30 situé à 9200 MPa. Seul le Gommier blanc s'en rapproche sensiblement avec un module caractéristique de 9063 MPa.

Les 5 essences présentent des modules d'élasticité axiale moyens supérieurs au D24 mais seuls le Gommier blanc et le Bois rivière font apparaître des valeurs caractéristiques des modules d'élasticité axiale supérieures au D24.

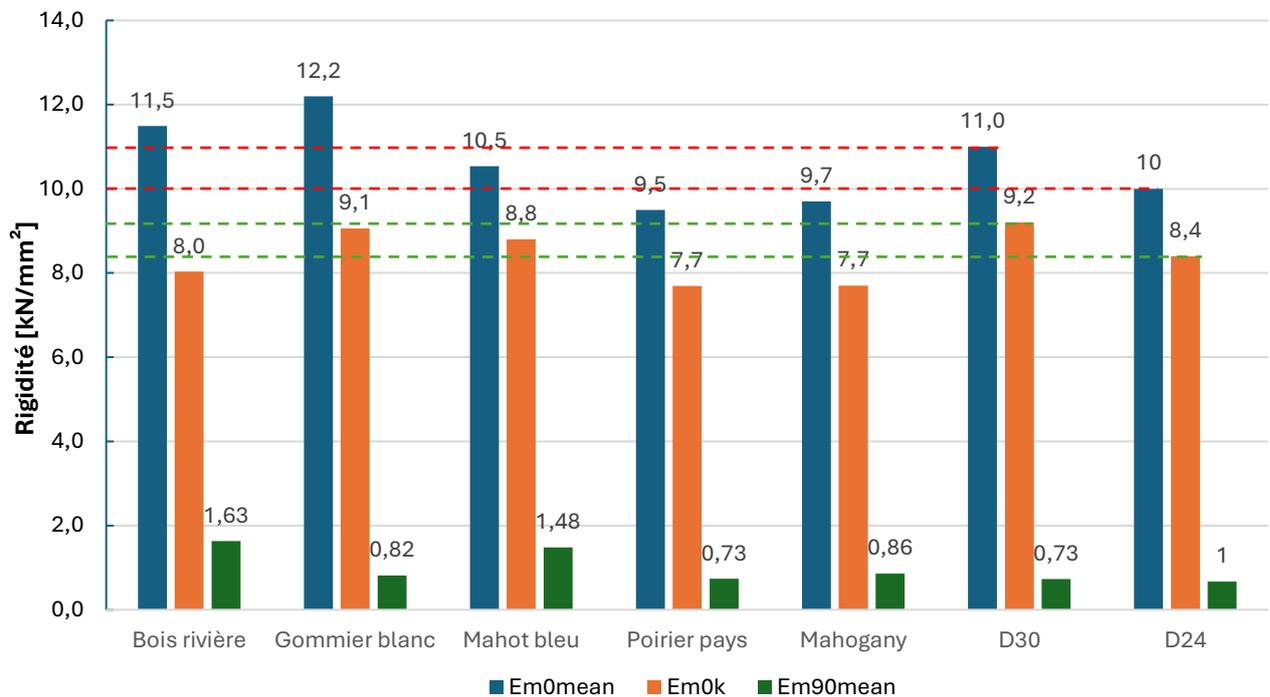


Figure 46 : Rigidités caractéristiques et moyennes des essences testées comparées à celles du D30.

Ainsi, si les essences devaient être classées mécaniquement selon la NF EN 338, le Mahot Bleu et le Gommier blanc seraient référencés comme D24 ne pouvant atteindre la classe D30 en raison de leurs faibles modules caractéristiques.

Toujours en raison des modules, le Bois rivière, le Poirier pays ainsi que le Mahogany ne pourraient être classés selon la NF EN 338, leurs modules caractéristiques étant inférieurs à ceux du D18.

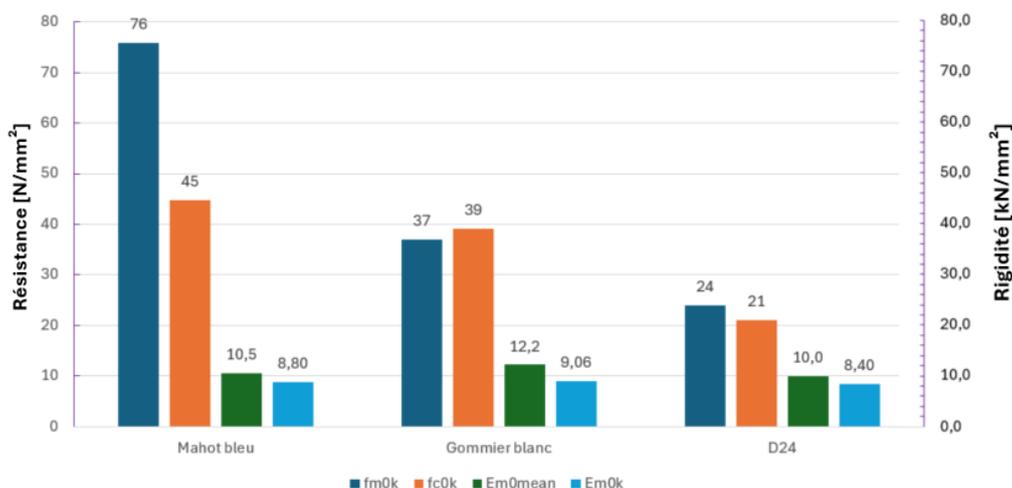


Figure 47 : Classement mécanique du Mahot bleu et du Gommier blanc

Au sujet des portances locales, on peut observer sur la Figure 48 que les bois exotiques testés, sont comparables en certains points aux feuillus des zones tempérées que nous connaissons. Les données concernant les propriétés de portance locale des bois des régions tempérées sont issues de la thèse de Thibault Benistand (21).

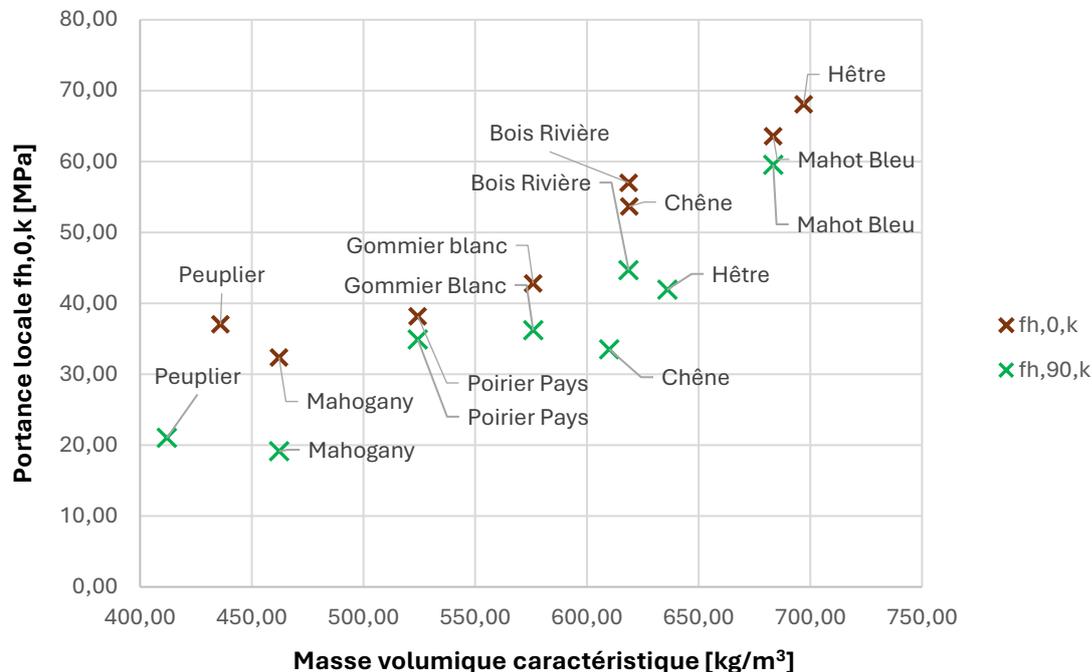


Figure 48 : Comparaison des valeurs de portance locale entre des feuillus de zones tempérées et des bois tropicaux

Au niveau de la portance locale axiale, à masses volumiques équivalentes, le Mahot Bleu est comparable au Hêtre, le Bois Rivière au Chêne, et le Poirier Pays au Peuplier même s'il présente une masse volumique supérieure à ce dernier, tandis que le Mahogany présente la portance locale axiale la plus faible. On remarque que les bois exotiques disposent de valeurs de portance locale perpendiculaire au sens des fibres bien plus élevées que celles de bois des régions tempérées. Le Mahot Bleu, le Gommier Blanc et le Poirier Pays présentent des valeurs de portances axiale et perpendiculaire assez proches les unes des autres, ce qui les distingue des feuillus des régions tempérées que nous connaissons.

Au regard des résultats expérimentaux, nous observons que les bois exotiques testés présentent des caractéristiques mécaniques principales sensiblement différentes de celles des bois exotiques natifs couramment utilisés en Guyane en construction bois.

Les valeurs utilisées par la suite au sujet des essences guyanaises sont issues des fiches rédigées et éditées par le Centre Technique Forestier Tropical (23–25).

Nous notons des modules d'élasticité axiale moyens bien inférieurs chez les bois testés par rapport à ceux des bois guyanais à savoir environ 10700 MPa en moyenne pour les premiers contre 14700 MPa en moyenne pour les seconds comme le montre la Figure 49.

Le module d'élasticité axial caractéristique moyen est utilisé pour le calcul des déplacements aux ELS et le module d'élasticité caractéristique axial est utilisé pour la vérification des phénomènes d'instabilité (déversement, flambement).

Ainsi, au regard de leurs faibles rigidités, les essences testées ne seront pas à privilégier dans l'hypothèse d'un emploi en flexion à l'image de solives, de pannes, de chevrons...

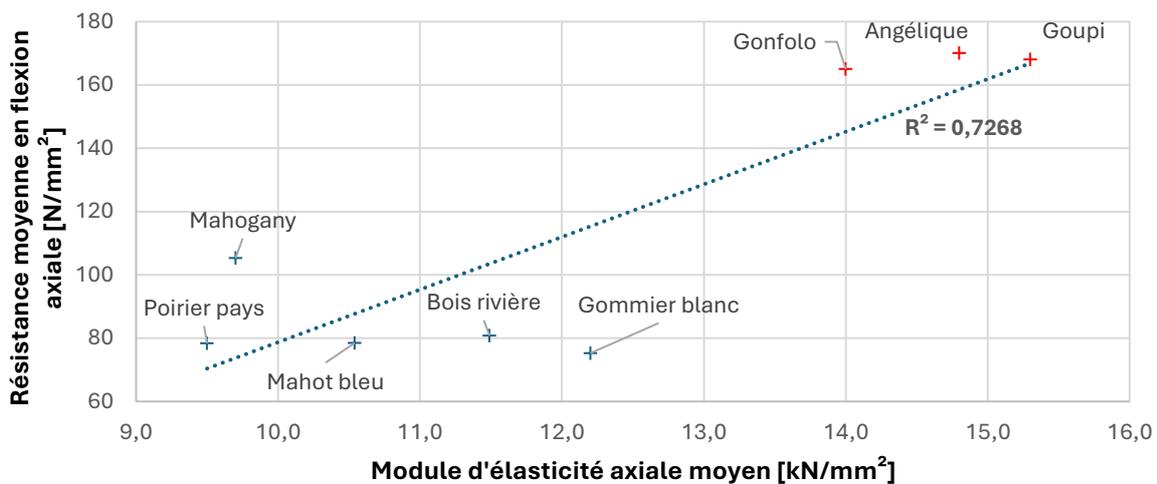


Figure 49 : Comparaison des modules de flexion axiale et de la résistance en flexion axiale des essences testées par rapport à des bois de Guyane

Au vu des fortes propriétés de résistance en compression axiale (Figure 50) et de portances locales axiale et transversale, un usage structural au sein d'éléments assemblés avec reprise d'efforts normaux à l'image de poutres treillis apparaît comme pertinent et porteur de perspectives intéressantes.

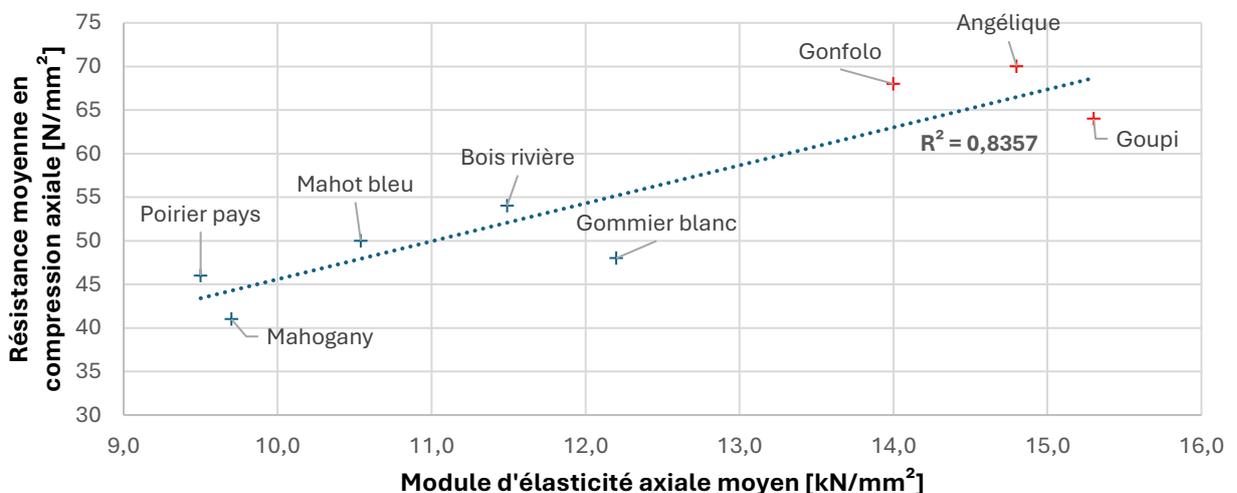


Figure 50 : Comparaison des modules de flexion axiale et de la résistance en compression axiale des essences testées par rapport à des bois de Guyane

Concernant les valeurs moyennes de résistance, nous observons des corrélations entre densité et résistance en compression axiale (Figure 51) ou en flexion (Figure 52).

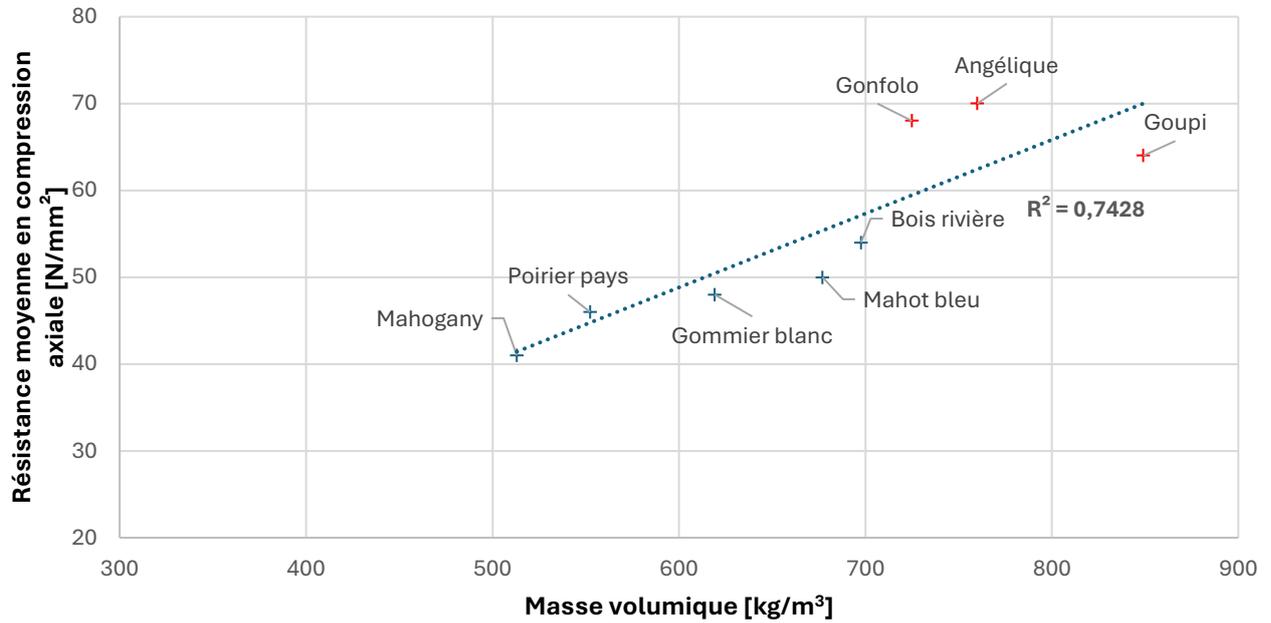


Figure 51 : Comparaison des résistances en compression axiale vis-à-vis des masses volumiques des essences testées par rapport à des bois de Guyane

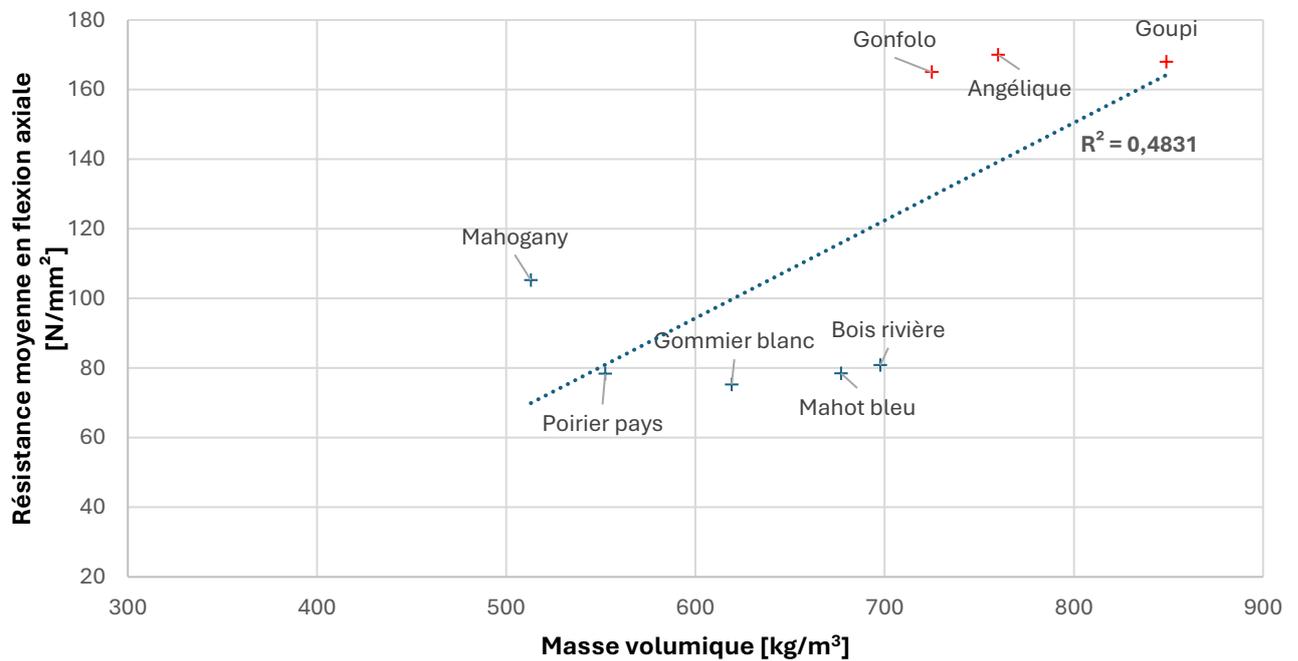


Figure 52 : Comparaison des résistances en flexion vis-à-vis des masses volumiques des essences testées par rapport à des bois de Guyane

Des 5 essences testées, le Gommier blanc, Mahot bleu et le Bois rivière font état des propriétés mécaniques les plus intéressantes.

Le Mahogany et le Poirier Pays sont les deux essences présentant les retraits tangentiels les plus faibles. On notera que le Poirier Pays possède un ratio RT/RR égale à 1.2 ce qui signifie qu'en séchant, sa section diminue sans changer de forme ou alors très légèrement. À l'opposé, le Gommier Blanc possède un ratio RT/RR conséquent égal à 1.9, duquel résulte un changement de forme lors du séchage. Nous avons d'ailleurs pu expérimenter cette caractéristique car le Gommier Blanc était le bois le plus compliqué à rectifier après séchage. Quant au Mahot Bleu et le Bois Rivière, leurs retraits tangentiels et radiaux sont proches de ceux du Douglas et de l'Aulne qui ont des masses volumiques bien moindres.

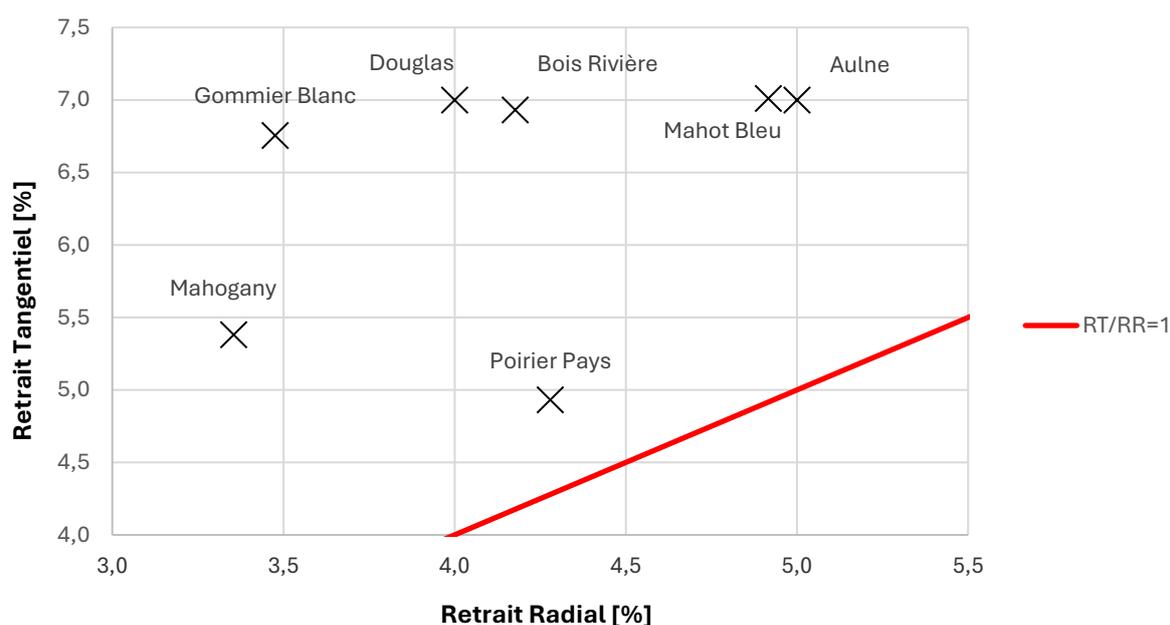


Figure 53 : Comparaison des retraits radiaux et tangentiels des bois exotiques avec des bois de régions tempérées

Nous noterons également un effort de coupe ressenti plus important lors du corroyage du Gommier blanc.

2. Corrélation entre les différentes propriétés mécaniques

Le Tableau 14 présente les différentes corrélations suivantes :

- MOR/Distance : Relation entre résistance et distance de la pièce par rapport au centre de l'arbre,
- MOE/Distance : Relation entre module d'élasticité et distance par rapport au centre de l'arbre,
- MOE/MOR : Relation entre résistance et module d'élasticité,
- MOE/MV : Relation entre module d'élasticité et masse volumique,
- MOR/MV : Relation entre résistance et masse volumique.

	Sollicitation	Corrélations R ²				
		MOR/Distance	MOE/Distance	MOE/MOR	MOE/MV	MOR/MV
Bois rivière	f_{mk}	0,18	0,13	0,60		
Gommier blanc		0,04	0,01	0,34		
Poirier pays		0,08	0,03	0,52		
Mahogany		0,10	0,05	0,18		
Mahot bleu		0,11	0,06	0,27		
Bois rivière	$f_{c,0,k}$	0,17	0,31	0,78	0,00	0,10
Gommier blanc		0,04	0,02	0,35	0,00	0,00
Poirier pays		0,06	0,08	0,65	0,01	0,10
Mahogany				0,41	0,11	0,10
Mahot bleu		0,01	0,01	0,54	0,00	0,18
Bois rivière	$f_{c,90,k}$	0,74	0,81	0,91		
Gommier blanc		0,41	0,19	0,41		
Poirier pays		0,44	0,48	0,90		
Mahogany		0,48	0,47	0,98		
Mahot bleu		0,03	0,03	0,58		
Bois Rivière	$f_{h,0,k}$	0.38				
Gommier Blanc		0.04				
Poirier Pays		0.02				
Mahogany		0.17				
Mahot Bleu		0.2				
Bois Rivière	$f_{h,90,k}$	0.33			0.72	
Gommier Blanc		0.09			0.19	
Poirier Pays		0.08			0.66	
Mahogany		0.06			0.80	
Mahot Bleu		0.14			0.15	

Tableau 14 : Corrélations entre les différentes propriétés mécaniques.

Nous remarquons qu'à l'issue des essais de flexion et de compression axiale aucune corrélation entre l'évolution des propriétés mécaniques et le positionnement de la pièce par rapport au centre de l'arbre n'a pu être mise en évidence.

En revanche, cette relation semble se vérifier avec les tests de compression transversale.

En effet, pour l'ensemble des essences testées de cette manière et à l'exception du Mahot bleu, les propriétés mécaniques, de résistance et de rigidité, augmentent à mesure que l'on s'éloigne du centre de l'arbre.

Les essais de portances locales axiale et transversale nous ont, quant à eux, permis de mettre en évidence la corrélation entre cette dernière et la masse volumique.

Les valeurs de portance présentées ci-dessous sont des valeurs moyennes.

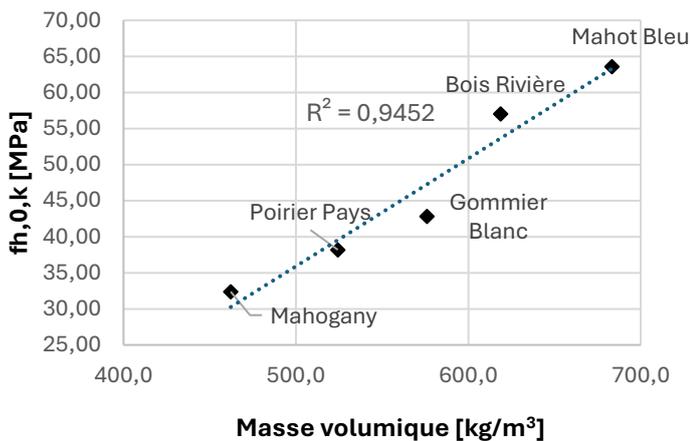


Figure 54 : Corrélation entre portance locale axiale et masse volumique

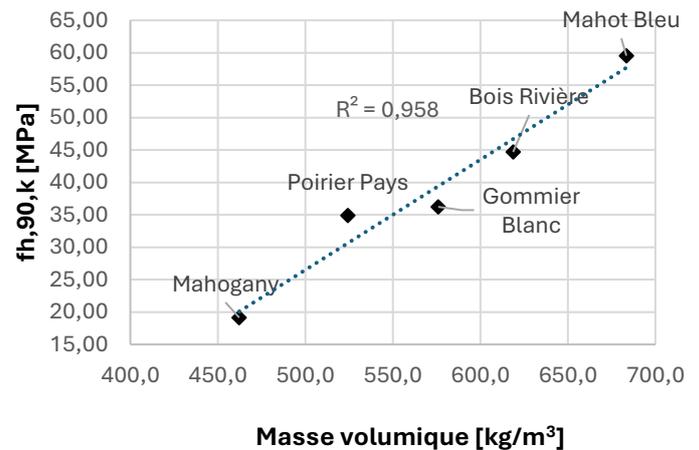


Figure 55 : Corrélation entre portance locale perpendiculaire et masse volumique

3. Calcul des propriétés mécaniques secondaires

Selon NF EN 384, il est possible, à partir des propriétés mécaniques principales, de déterminer celles secondaires. Cependant, cette disposition est prévue pour les bois feuillus et résineux des régions tempérées.

Afin de juger de la pertinence d'utiliser les formules proposées dans la présente norme nous avons comparé les valeurs expérimentales de résistances en compression axiale et transversale ainsi que de module d'élasticité transversal dont nous disposons avec celles calculées selon les formules données par la norme.

Dans les tableaux ci-dessous, la classe C désigne des bois résineux et la classe D des bois feuillus.

– Détermination de la résistance à la compression axiale :

Essence	f_{mk}	$f_{c,0,k}$	Classe C		Classe D	
			$f_{c,0,d} = 4.3(f_{mk})^{0.5}$	Delta	$f_{c,0,d} = 4.3(f_{mk})^{0.5}$	Delta
Bois rivière	43	44	28	35,67%	28	35,67%
Gommier blanc	37	39	26	33,19%	26	33,19%
Mahot bleu	76	45	37	16,49%	37	16,49%
Poirier pays	50	39	30	21,50%	30	21,50%
Mahogany	52	32	31	1,59%	31	1,59%

Tableau 15 : Calcul de la résistance à la compression axiale selon la NF EN 384.

Avec :

f_{mk} : Résistance à la flexion caractéristique déterminée expérimentalement,

$f_{c,0,k}$: Résistance à la compression axiale caractéristique déterminée expérimentalement,

$f_{c,0,d}$: Résistance à la compression axiale déterminée par calcul selon la NF EN 384.

– **Détermination de la résistance à la compression transversale :**

Essence	ρ_k	$f_{c,90,k}$	Classe C		Classe D	
			$f_{c,90,d} = 0.007\rho_k$	Delta	$f_{c,90,d} = 0.010\rho_k$	Delta
Bois rivière	649	13,6	4,5	66,61%	6,5	52,30%
Gommier blanc	520	7,1	3,6	48,46%	5,2	26,37%
Mahot bleu	619	11,6	4,3	62,67%	6,2	46,67%
Poirier pays	464	6,9	3,3	52,61%	4,6	32,30%
Mahogany	428	4,5	3,0	33,78%	4,3	5,41%

Tableau 16 : Calcul de la résistance à la compression transversale selon la NF EN 384.

Avec :

ρ_k : Masse volumique caractéristique déterminée expérimentalement,

$f_{c,90,k}$: Résistance à la compression transversale caractéristique déterminée expérimentalement,

$f_{c,90,d}$: Résistance à la compression transversale déterminée par calcul selon la NF EN 384.

– **Détermination du module de compression transversale :**

Essence	$E_{m,0,mean}$	$E_{m,90,mean}$	Classe C		Classe D	
			$E_{m,90,d} = \frac{E_{m,0,mean}}{30}$	Delta	$E_{m,90,d} = \frac{E_{m,0,mean}}{15}$	Delta
Bois rivière	11490	1633	383	76,54%	766	53,09%
Gommier blanc	12209	816	407	50,13%	814	0,26%
Mahot bleu	10547	1477	352	76,20%	703	52,39%
Poirier pays	9510	735	317	56,85%	634	13,69%
Mahogany	9711	858	324	62,29%	647	24,59%

Tableau 17 : Calcul du module d'élasticité transversale selon la NF EN 384.

Avec

$E_{m,0,mean}$: Module d'élasticité axiale moyen déterminée expérimentalement,

$E_{m,90,mean}$: Module d'élasticité transversale moyen déterminé expérimentalement,

$E_{m,90,d}$: Module d'élasticité transversale moyen déterminée par calcul selon la NF EN 384.

Au regard des écarts importants observés, l'application des formules de la NF EN 384 pour les essences étudiées afin de déterminer les propriétés secondaires de celles-ci semble peu adaptée.

Il conviendrait de réaliser des essais supplémentaires afin de déterminer ces propriétés mécaniques secondaires et potentiellement aboutir à la création d'une corrélation entre propriétés principales et secondaires pour ces essences.

Ceci soulève également l'intérêt de créer une norme analogue à la NF EN 384 mais spécifique aux bois tropicaux

Au sujet de la formule proposée par la NF EN 384 concernant le module d'élasticité et adaptée aux résineux :

$$E_0 = E_{m,global(uref)} * 1.3 - 2690$$

Celle-ci fait état d'un écart entre module local expérimental et local calculé de 5% en moyenne sur 40 éprouvettes testées validant potentiellement son usage pour le Mahogany grandes feuilles.

4. Mise en perspective des résultats au regard de l'Eurocode 5

Dans la continuité de la réflexion sur le calcul des propriétés mécaniques secondaires, nous allons ici étudier la possibilité d'appliquer ou non les formules de calcul des portances locales issues de l'Eurocode 5 et rappelées ci-dessous :

$$f_{h,0,k} = 0.082 \times (1 - 0.01 \times d) \times \rho_k \quad f_{h,90,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \times \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$$

Avec pour les feuillus, $k_{90} = 0.90 + 0.015 \times d$

Les résultats et les conclusions que nous pouvons en tirer sont assez hétérogènes, la formule de l'Eurocode 5 semble particulièrement adaptée au Poirier Pays et au Gommier Blanc qui présentent un écart maximal de 6% entre les résultats expérimentaux et les résultats théoriques. Concernant le Mahogany, les résultats de portance locale axiale suivent également la formule de l'Eurocode 5, ce qui n'est pas le cas de la portance locale

perpendiculaire aux fibres. On peut cependant noter qu'en utilisant un k_{90} pour les résineux, on passe de 61% d'écart entre l'expérimentation et la théorie à 13.99%. La formule de l'EC5 ne semble pas adaptée au bois Rivière ainsi qu'au Mahot Bleu, questionnant une nouvelle fois l'intérêt de créer un document similaire spécifique aux bois tropicaux afin d'exploiter le potentiel maximum de ces bois et éviter le surdimensionnement.

Essence	$f_{h,0,k}$			$f_{h,90,k}$		
	$f_{h,0,k}$ expérimental (MPa)	$f_{h,90,k}$ théorique (MPa)	Delta expérimentation/théorie	$f_{h,90,k}$ expérimental (MPa)	$f_{h,90,k}$ théorique (MPa)	Delta expérimentation/théorie
Mahogany	32,38	33,4	3%	19,15	30,9	61%
Bois Rivière	57,02	44,6	22%	44,68	41,3	7%
Mahot Bleu	63,58	49,3	22%	59,55	45,7	23%
Gommier Blanc	42,81	41,6	3%	36,23	38,5	6%
Poirier Pays	38,19	37,8	1%	34,90	35,0	0%

Tableau 18 : Vérification de l'applicabilité de la formule de portance locale EC5

Essence		Bois rivière	Gommier blanc	Mahot bleu	Poirier pays	Mahogany	
Propriétés de résistance en N/mm²							Grandes longueurs
Flexion	$f_{m,0,k}$	43	37	76	50	52	33
Traction axiale	$f_{t,0,k}$						
Traction transversale	$f_{t,90,k}$						
Compression axiale	$f_{c,0,k}$	44	39	45	39	32	
Compression transversale	$f_{c,90,k}$	13,6	7,1	11,6	6,9	4,5	
Cisaillement	$f_{v,k}$						
Propriétés de rigidité en N/mm²							
Module d'élasticité moyen en flexion axiale	$E_{m,0,mean}$	11490	12209	10547	9510	9711	10386
Module d'élasticité caractéristique à 5% d'exclusion en flexion axiale	$E_{m,0,k}$	8036	9064	8809	7694	7713	8889
Module d'élasticité moyen en compression axiale	$E_{m,0,mean}$	10861	11143	9674	8108	8433	
Module d'élasticité caractéristique à 5% d'exclusion en compression axiale	$E_{m,0,k}$	7595	7230	7843	6270	6343	
Module d'élasticité transversal moyen	$E_{m,90,mean}$	1633	816	1477	735	858	
Module de cisaillement moyen	G_{mean}						455
Masse volumique en kg/m³							
Masse volumique caractéristique à 5% d'exclusion	ρ_k	649	520	619	464	428	
Masse volumique moyenne	ρ_{mean}	698	619	677	552	512	
Portance locale en N/mm²							
Portance locale axiale moyenne	$f_{h,0,mean}$	73,10	51,00	73,33	46,93	42,27	
Portance locale axiale caractéristique à 5% d'exclusion	$f_{h,0,k}$	57,02	42,81	63,58	38,19	32,38	
Portance locale perpendiculaire moyenne	$f_{h,90,mean}$	60,36	45,69	69,22	43,78	29,64	
Portance locale perpendiculaire caractéristique à 5% d'exclusion	$f_{h,90,k}$	44,68	36,23	59,55	34,90	19,15	

Tableau 19 : Synthèse des résultats

XIV. Conclusion

Comme nous l'avons montré dans le corps de ce rapport, les 5 essences tropicales que nous avons testées, sont comparables en certains points aux feuillus des régions tempérées notamment en termes de module d'élasticité axiale ou de masse volumique.

Ils présentent par ailleurs des résistances en compression axiale, transversale et des valeurs de portance locale supérieures à ces derniers.



Figure 56 : Poutres treillis



Figure 57 : Assemblage en pied de poteau

Cependant, leur rigidité relativement faible rend difficile leur emploi dans des modes de sollicitation en flexion (solives, pannes, chevrons...).

Ainsi, leur bonne capacité à être assemblées, leurs propriétés mécaniques axiales intéressantes, rend l'usage de ces essences pertinent dans des structures sollicitant les éléments sous efforts normaux à l'image de poutres treillis (Figure 56), ou encore de porteurs verticaux (Figure 57). En outre, en raison de leur faible module d'élasticité axial caractéristique, des éléments de faible élancement seront à privilégier afin d'éviter les phénomènes d'instabilité (déversement).

Il faut néanmoins préciser que leur utilisation sous un mode de sollicitation normal devra faire l'objet de tests mécaniques complémentaires en traction.

De la même manière, des études de durabilité et de compatibilité avec des produits de préservation devront être menées au sujet de ces essences.

Les études à venir devront également porter sur des aspects variés comme le rendement matière ou encore l'usure des outils d'usinage.

C'est seulement dans une démarche d'étude complète de ces essences, mobilisant l'ensemble du prisme de compétences de la filière, que pourra se dessiner une perspective d'exploitation de ces bois à l'échelle locale dans une optique pérenne et efficiente.

XV. Bibliographie

1. AFNOR. NF B52-001-1 - Règles d'utilisation du bois dans la construction - Classement visuel pour l'emploi en structures des bois sciés résineux et feuillus - Partie 1 : bois massif. 2018 avr p. 38.
2. AFNOR. NF EN 1309-3 - Bois ronds et bois sciés - Méthode de mesure - Partie 3 : singularités et altérations biologiques. 2018 janv p. 37.
3. Viguié J. Classement mécanique des bois de structure. Prise en compte des singularités dans la modélisation du comportement mécanique [Internet] [phdthesis]. Université de Lorraine; 2015 [cité 25 oct 2024]. Disponible sur: <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01754622>
4. Lanvin JD, Reuling D. Caractérisation du Chêne sessile et pédonculé de France en vue de son utilisation en structure. Revue forestière française. 2012;64(2):151-65.
5. Zobel B, Webb C, Henson F. Core or juvenile wood of Loblolly and Slash Pine trees. Vol. 42. 1959.
6. Mille G, Louppe D. Mémento du forestier tropical. Editions Quae; 2015. 1202 p.
7. Joachim B Hans, Carmen S. Timber Engineering - Principles for Design. KIT Scientific Publishing; 2017. 658 p.
8. AFNOR. NF EN 384+A2 - Bois de structure - Détermination des valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques et de la masse volumique. 2022 juin p. 29.
9. ALEON D, CHANRION P, NEGRIE G, PEREZ J, SNIEG O. Séchage du bois. Guide pratique. Séchage du bois Guide pratique. 1990;(C133).
10. Reinhard B. Le séchage sous vide : Quand et pourquoi ? 1999 p. 21.
11. Sales Ch. Le séchage des bois tropicaux. 1979 p. 19.
12. AFNOR. ISO 3129 - Bois - Méthodes d'échantillonnage et conditions générales pour les essais physiques et mécaniques de petites éprouvettes de bois net. 2019.
13. AFNOR. NF EN 13183-2 - Teneur en humidité d'une pièce de bois scié - Partie 2 : estimation par méthode électrique par résistance. 2002.

14. AFNOR. NF EN 13183-1 - Teneur en humidité d'une pièce de bois scié - Partie 1 : détermination par la méthode par dessiccation. 2002.
15. AFNOR. NF ISO 13061-14 - Retrait volumique. p. 15.
16. Parant B, Boyer F, Chichignoud M, Gérard J. Présentation graphique des caractères technologiques des principaux bois tropicaux. Tome 7 : Bois de Martinique [Internet]. CIRAD-CTFT; 1989 [cité 12 févr 2025]. Disponible sur: <https://agritrop.cirad.fr/342549/>
17. AFNOR. NF EN 408+A1 - Structures en bois - Bois de structure et bois lamellé-collé - Détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques. 2012 sept p. 38.
18. AFNOR. NF B51-016 - Flexion statique - Détermination du module d'élasticité axial de petites éprouvettes sans défauts. 1987 p. 10.
19. AFNOR. NF B51-013 - Bois Détermination de la dureté MONNIN. 1985 sept p. 10.
20. AFNOR. NF EN 338 - Bois de structure - Classes de résistance. 2016 juill p. 17.
21. Benistand T. Caractérisation mécanique des bois feuillus Français en vue de leur meilleure intégration aux Eurocodes 5 [Internet] [phdthesis]. Université de Lorraine; 2019 [cité 10 oct 2024]. Disponible sur: <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-02552376>
22. AFNOR. NF EN 14358 - Structures en bois - Détermination et vérification des valeurs caractéristiques. 2016.
23. Centre Technique Forestier Tropical. Bois de Guyane - Goupi [Internet]. Disponible sur: <https://ctbg.cirad.fr/content/download/1065/5660/file/Goupi.pdf>
24. Centre Technique Forestier Tropical. Bois de Guyane - Angélique [Internet]. Disponible sur: <https://ctbg.cirad.fr/content/download/1061/5648/file/Ang%C3%A9lique.pdf>
25. Centre Technique Forestier Tropical. Bois de Guyane - Gonfolo [Internet]. Disponible sur: <https://ctbg.cirad.fr/content/download/1079/5702/file/Gonfolo.pdf>

XVI. Liste des figures

Figure 1 : Schéma type de l'arbre	10
Figure 2 : Schéma anatomique d'un tronc	11
Figure 3 : Plan de référence du bois.....	12
Figure 4 : Croissance d'un pin.....	14
Figure 5 : Impact de l'humidité sur les propriétés mécaniques.	15
Figure 6 : Echantillonnage minimal exigé selon la ISO 3129	17
Figure 7 : Echantillonnage complet.	17
Figure 8 : Reconstitution d'une planche entière	18
Figure 9 : Guide pratique du séchage du bois. CTBA	18
Figure 10 : Colisage et cerclage des pièces de grande longueur	19
Figure 11 : Isothermes de sorption du bois dans le plan température-humidité d'après Keylwerth.....	19
Figure 12 : Eprouvette ayant été soumise au séchage à 103°.....	20
Figure 13 : Code couleur exprimant la distance à la moëlle (en cm).....	20
Figure 15 : Tracé d'une section transversale de plateau éloignée de la moëlle	21
Figure 14 : Exemple de tracé de la distance à la moëlle	21
Figure 16 : Fente des bois à l'aide d'une fendeuse mobile	22
Figure 17 : Délignage à l'aide d'une scie à ruban	22
Figure 18 : Délignage avec pente.....	22
Figure 19 : Dégauchissage.....	22
Figure 20 : Eprouvette finale	23
Figure 21 : Référencement des éprouvettes	23
Figure 22 : Illustration du marquage des éprouvettes.....	24
Figure 23 : Palettisation pour séchage à l'air libre	25
Figure 24 : Disposition des éprouvettes dans le séchoir.....	26
Figure 25 : De gauche à droite, les deux premières photographies montrent le séchoir sous vide du lycée avec les éprouvettes disposées sur le chariot. La troisième photographie montre les éprouvettes de 30x30mm corroyées et prêtes au tronçonnage	27
Figure 26 : Cotes du banc d'essai exprimées en mm	29
Figure 27 : Vue générale du banc d'essai et du système de mesure des déplacements local et global	29
Figure 28 : Cotes du banc d'essai issu de la NF EN 51-016 exprimées en mm	30
Figure 29 : Dispositif de mesure du module global et vue générale du banc d'essai	30
Figure 30 : Gabarit de rectification de faces et éprouvettes avant et après rectification de la longueur par machine à commande numérique	31
Figure 31 : Banc d'essai de compression axiale avec capteur de prise du module d'élasticité.....	31

Figure 32 : Banc d'essai de compression transversale et rupture type d'une éprouvette sollicitée de la sorte	32
Figure 33 : Pincés pour les essais de portances locales.....	32
Figure 34 : Perçage des éprouvettes de portance à l'aide d'une machine à commande numérique.....	32
Figure 35 : Banc d'essai de portance locale axiale.....	33
Figure 36 : Cycle de chargement essai de portance locale	33
Figure 37 : Banc d'essai de dureté Monnin et mesure de l'empreinte.	34
Figure 33 : Immersion des éprouvettes afin d'assurer l'état de saturation des bois.....	34
Figure 34 : Séchage des éprouvettes à l'étuve et relevé dimensionnel au pied à coulisse.	35
Figure 40 : Schéma du rayon de courbure.....	36
Figure 41 : Courbe d'essai force/déplacement	39
Figure 42 : Courbe type d'un essai d'enfoncement. Graphique issu de la thèse de Thibault Benistand (21)	41
Figure 43 : Eprouvettes supprimées du dépouillement en raison de singularités, ici des nœuds, ayant conduit à une rupture prématurée lors des essais.....	46
Figure 44 : CoMParatif des masses volumiques des essences caractérisées avec le D24 et D30.	51
Figure 45 : Résistances caractéristiques des essences testées comparées à celles du D30.	52
Figure 46 : Rigidités caractéristiques et moyennes des essences testées comparées à celles du D30.	53
Figure 47 : Classement mécanique du Mahot bleu et du Gommier blanc.....	53
Figure 48 : Comparaison des valeurs de portance locale entre des feuillus de zones tempérées et des bois tropicaux.....	54
Figure 49 : Comparaison des modules de flexion axiale et de la résistance en flexion axiale des essences testées par rapport à des bois de Guyane	55
Figure 50 : Comparaison des modules de flexion axiale et de la résistance en compression axiale des essences testées par rapport à des bois de Guyane	55
Figure 51 : Comparaison des résistances en compression axiale vis-à-vis des masses volumiques des essences testées par rapport à des bois de Guyane.....	56
Figure 52 : Comparaison des résistances en flexion vis-à-vis des masses volumiques des essences testées par rapport à des bois de Guyane.....	56
Figure 53 : Comparaison des retraits radial et tangentiel des bois exotiques avec des bois de régions tempérées	57
Figure 49 : Corrélation entre portance locale axiale et masse volumique	59
Figure 50 : Corrélation entre portance locale perpendiculaire et masse volumique	59
Figure 51 : Poutres treillis	64
Figure 57 : Assemblage en pied de poteau.....	64

XVII. Liste des tableaux

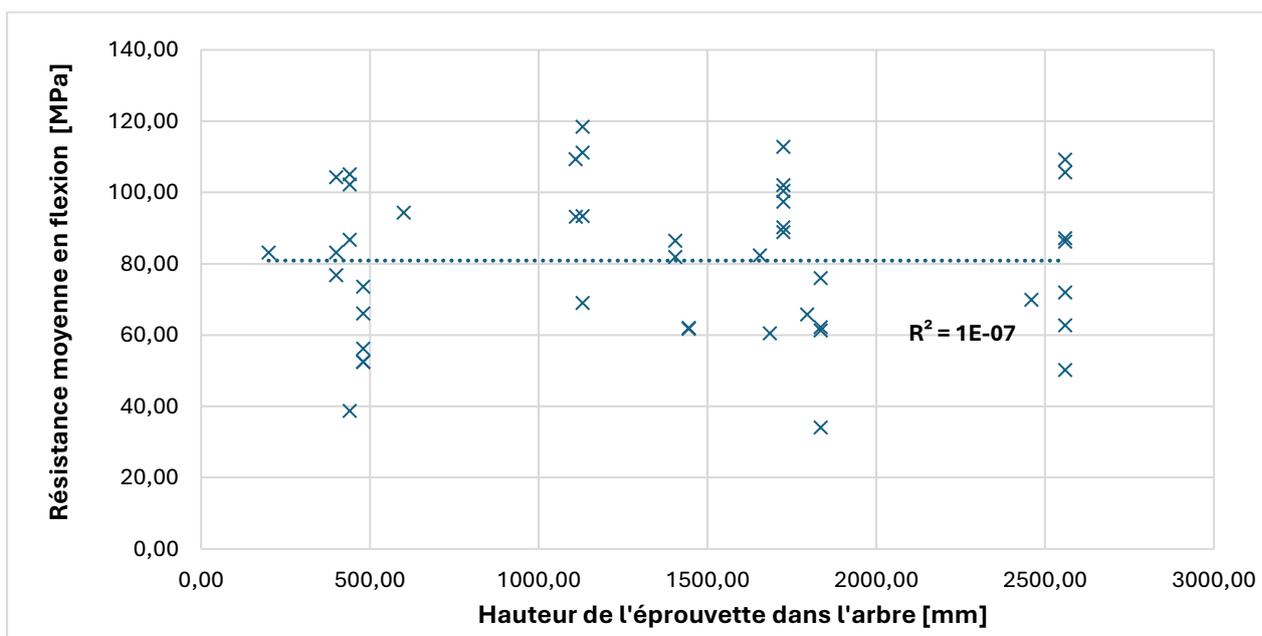
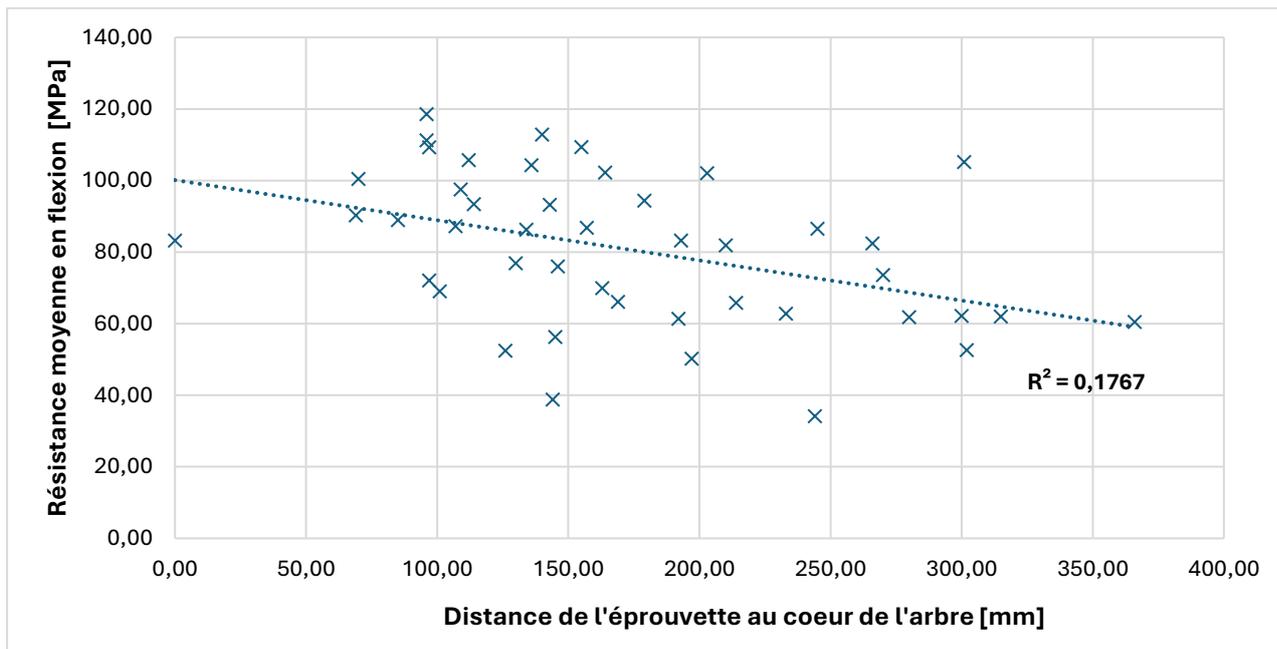
Tableau 1 : Synthèse du pré-débit	25
Tableau 2: Table de séchage du Chêne.....	26
Tableau 3 : Récapitulatif des échantillons à tester	35
Tableau 4 : Synthèse des résultats d'essais - Flexion 4 points sur éprouvettes en dimensions d'emploi.	47
Tableau 5 : Synthèse des résultats - Flexion 4 points des éprouvettes sans défauts.	47
Tableau 6 : Synthèse des résultats - Compression axiale des éprouvettes sans défauts.	48
Tableau 7 : Synthèse des résultats - Compression transversale des éprouvettes sans défauts.	48
Tableau 8 : Synthèse des résultats - Dureté Monnin - Eprouvettes sans défauts.	48
Tableau 9 : Echelle de dureté Monnin.....	49
Tableau 10 : Synthèse des résultats – Portance locale parallèle au fil – éprouvettes sans défauts.....	49
Tableau 11 : Synthèse des résultats – Portance locale perpendiculaire au fil – éprouvettes sans défauts.....	49
Tableau 12 : Synthèse des résultats – Retraits volumiques – Eprouvettes sans défauts	50
Tableau 13 : Synthèse des résultats - Retraits et coefficient de variation volumique - éprouvettes sans défauts.....	51
Tableau 14 : Corrélation entre les différentes propriétés mécaniques.....	58
Tableau 15 : Calcul de la résistance à la compression axiale selon la NF EN 384.	59
Tableau 16 : Calcul de la résistance à la compression transversale selon la NF EN 384.	60
Tableau 17 : Calcul du module d'élasticité transversale selon la NF EN 384.	60
Tableau 18 : Vérification de l'applicabilité de la formule de portance locale EC5	62
Tableau 19 : Synthèse des résultats	63

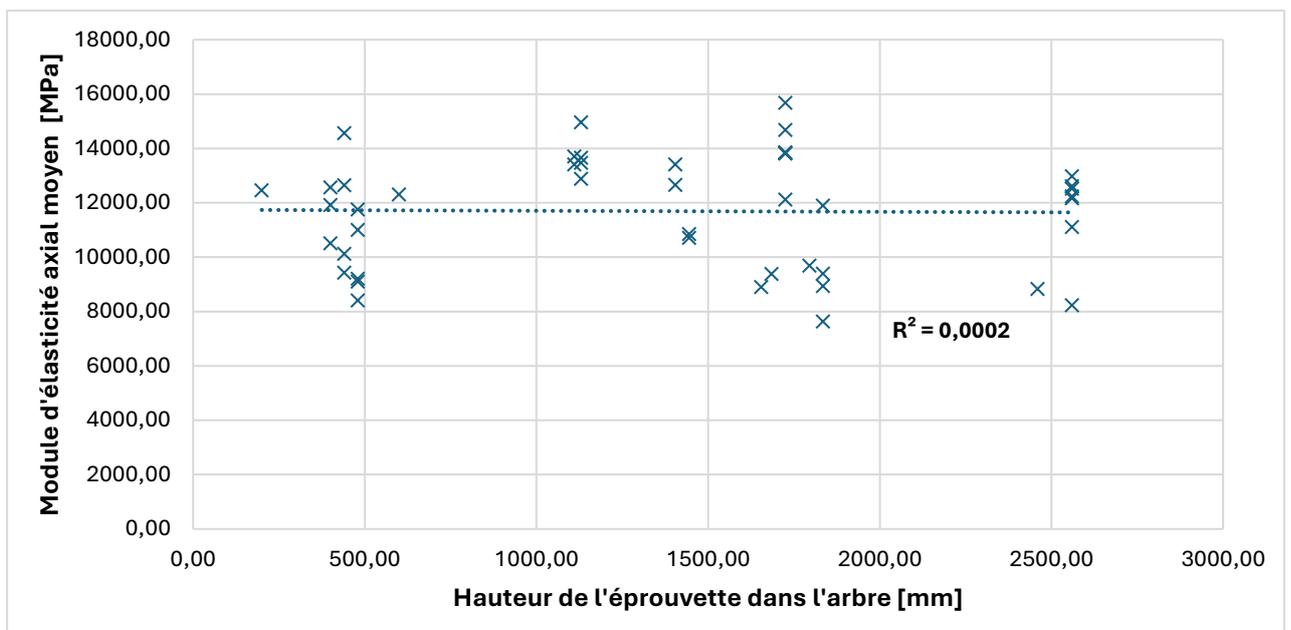
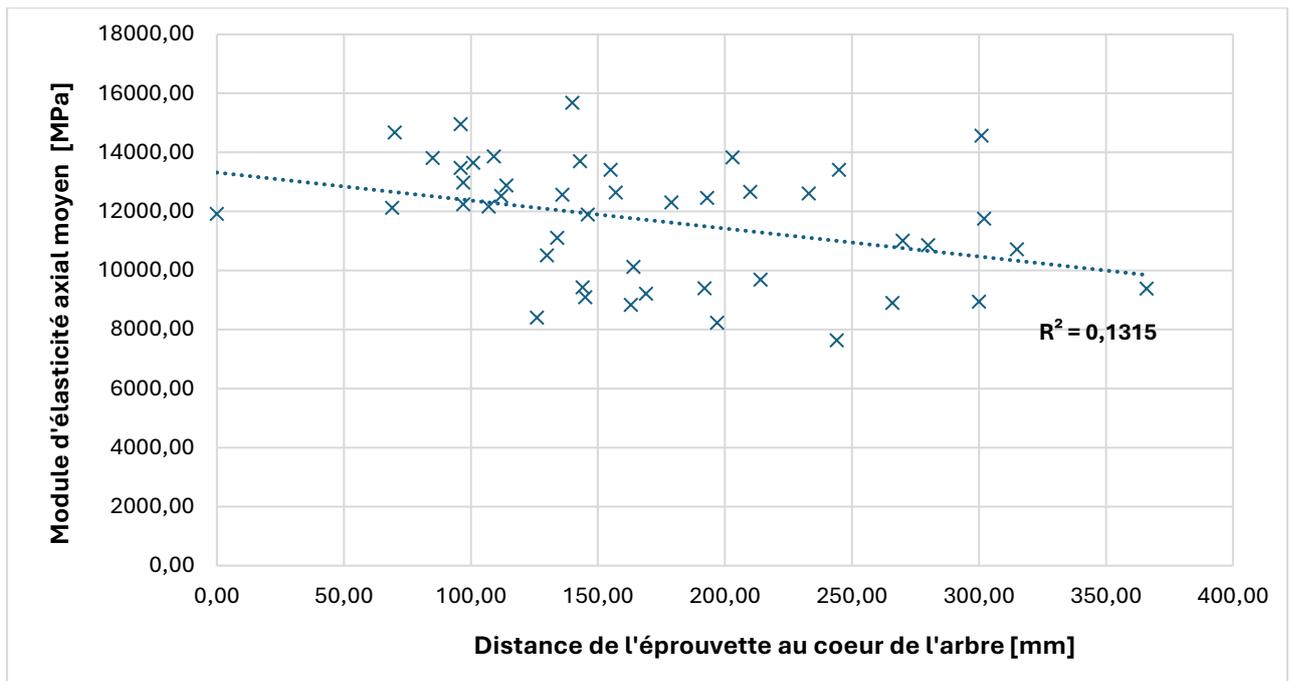
XVIII. Annexes

Les annexes suivantes présentent pour chaque essence, l'évolution des propriétés mécaniques (résistance et rigidité) en fonction de la position de l'éprouvette par rapport au centre de l'arbre et de la hauteur de prélèvement.

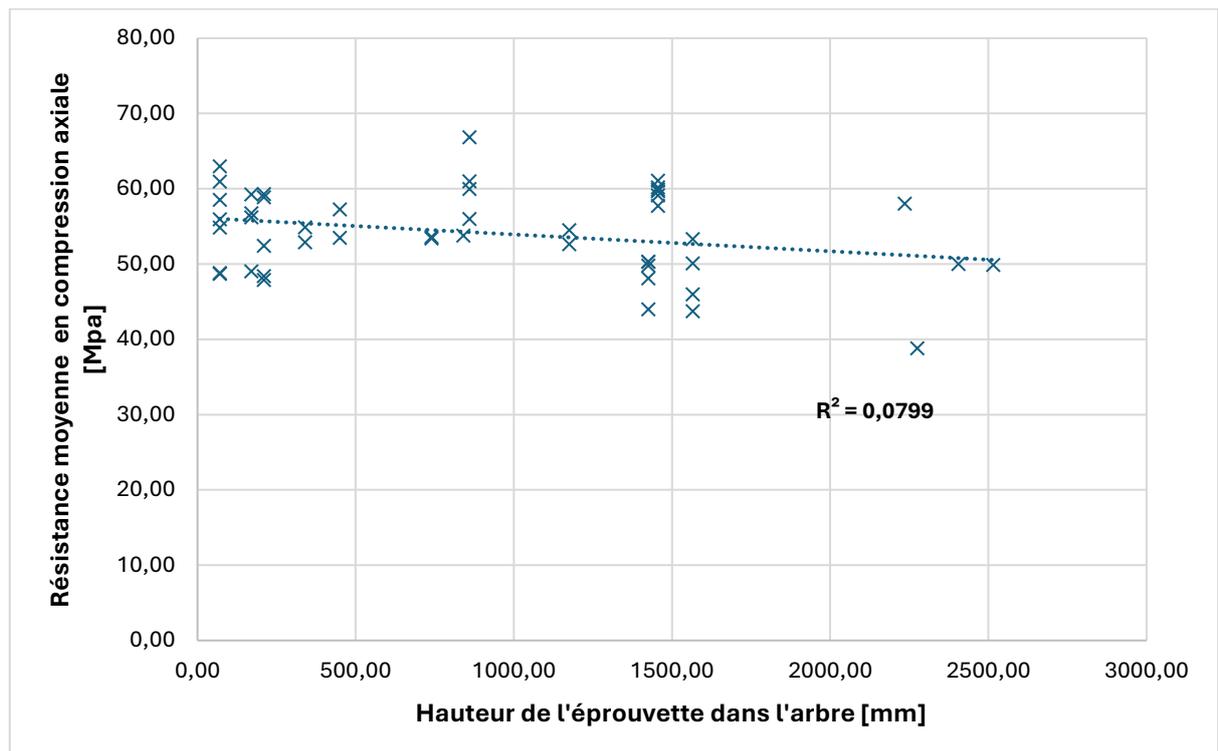
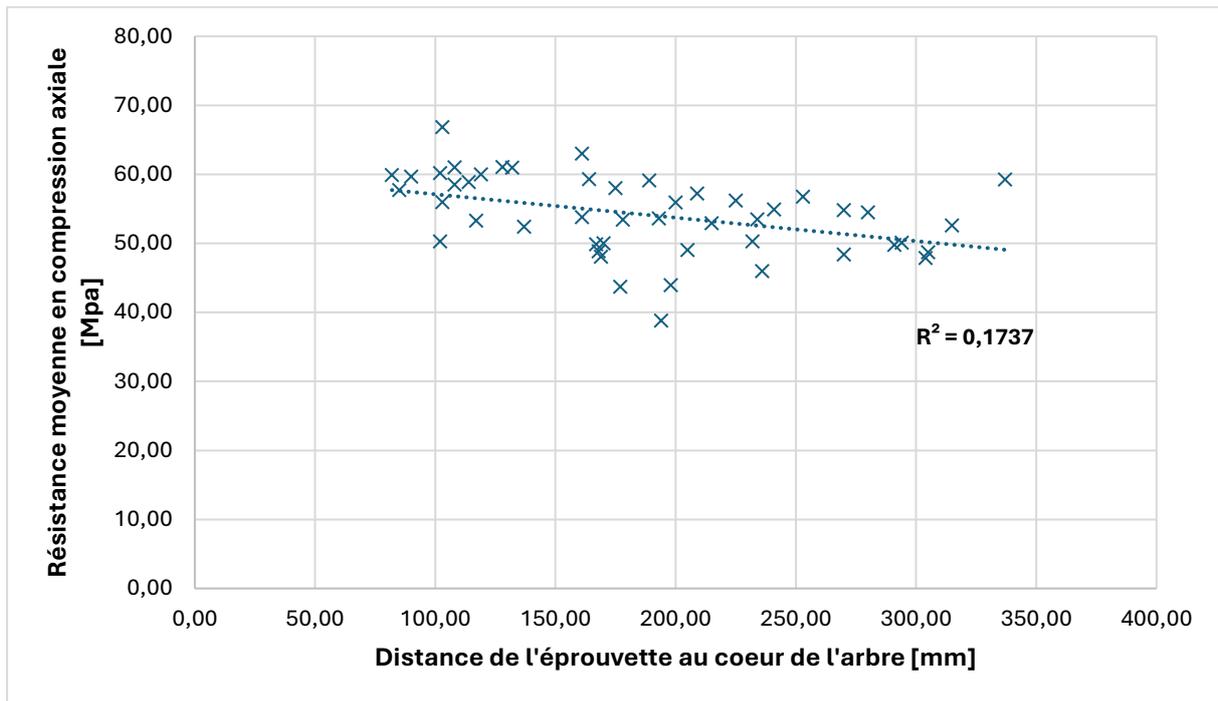
BOIS RIVIERE

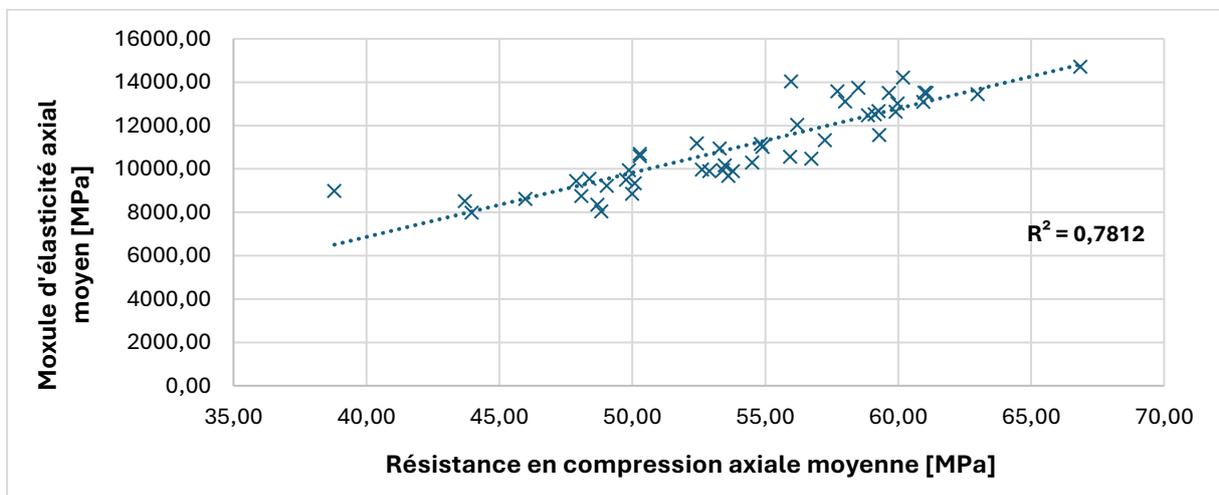
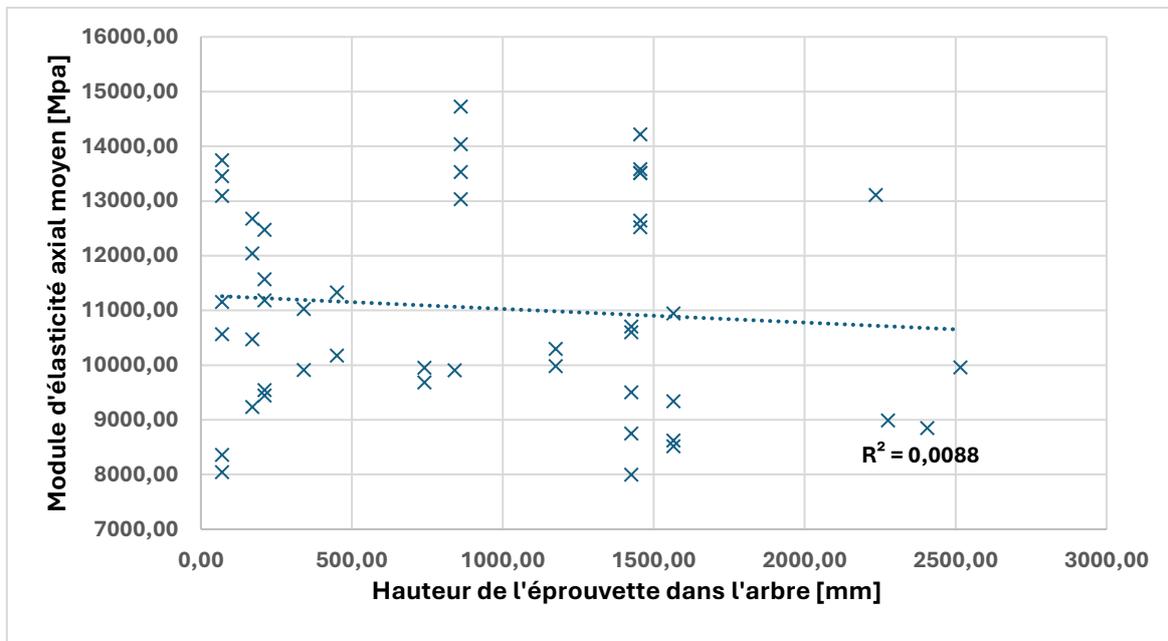
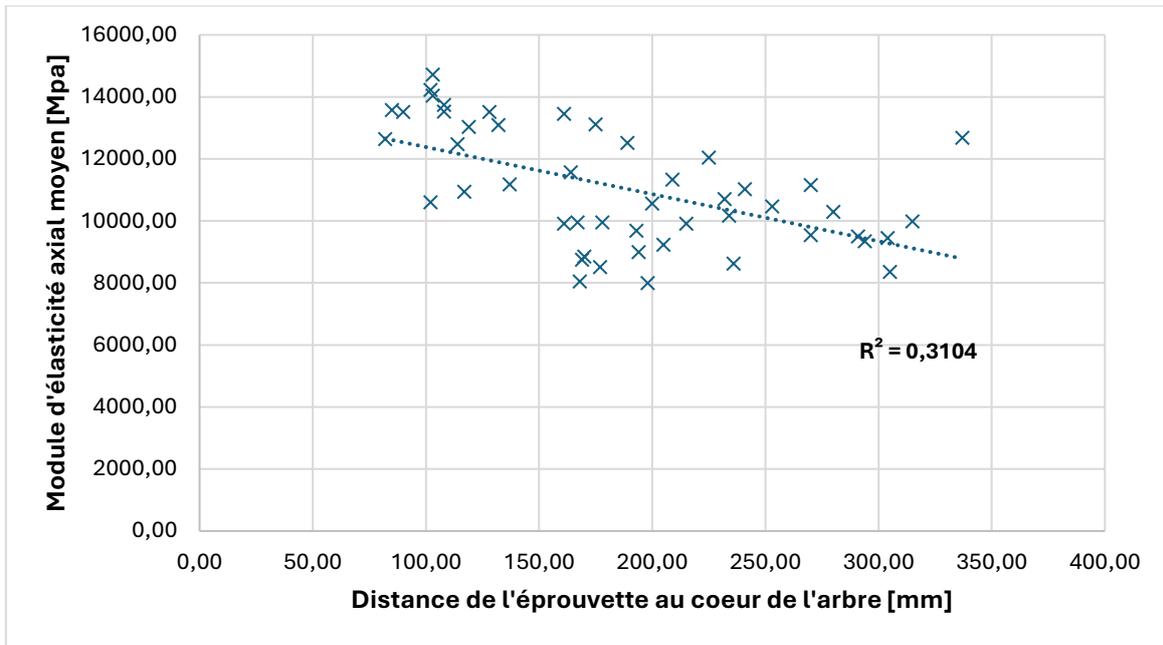
Essais de flexion :



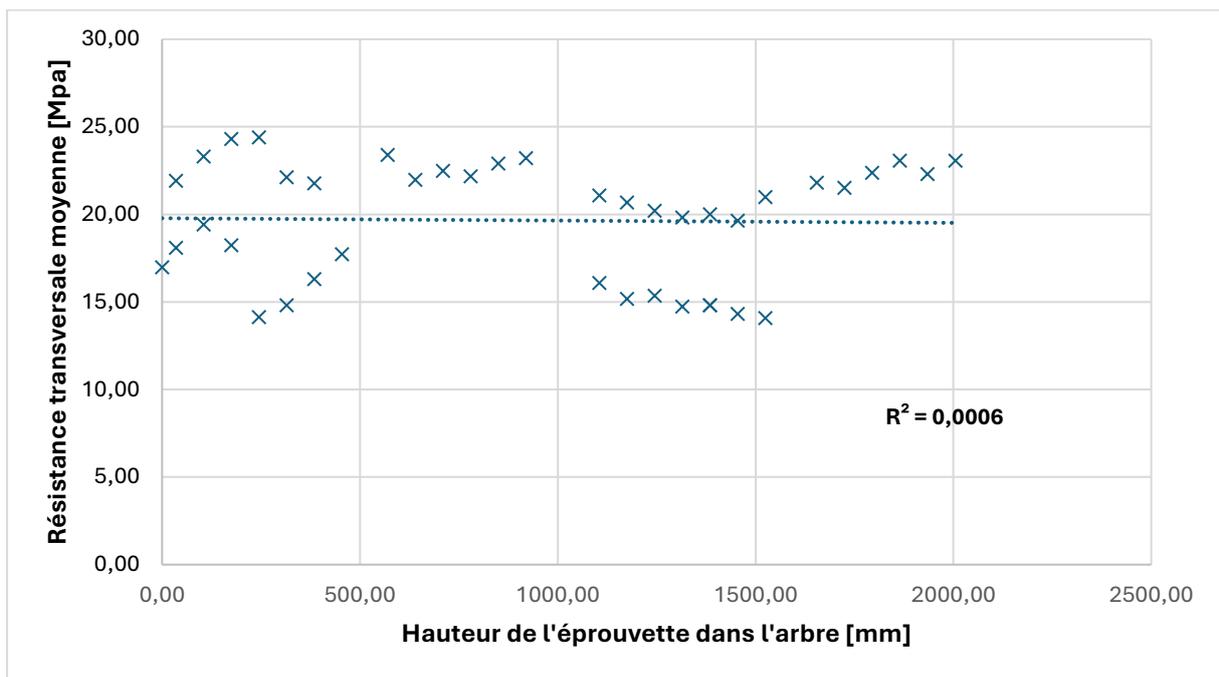
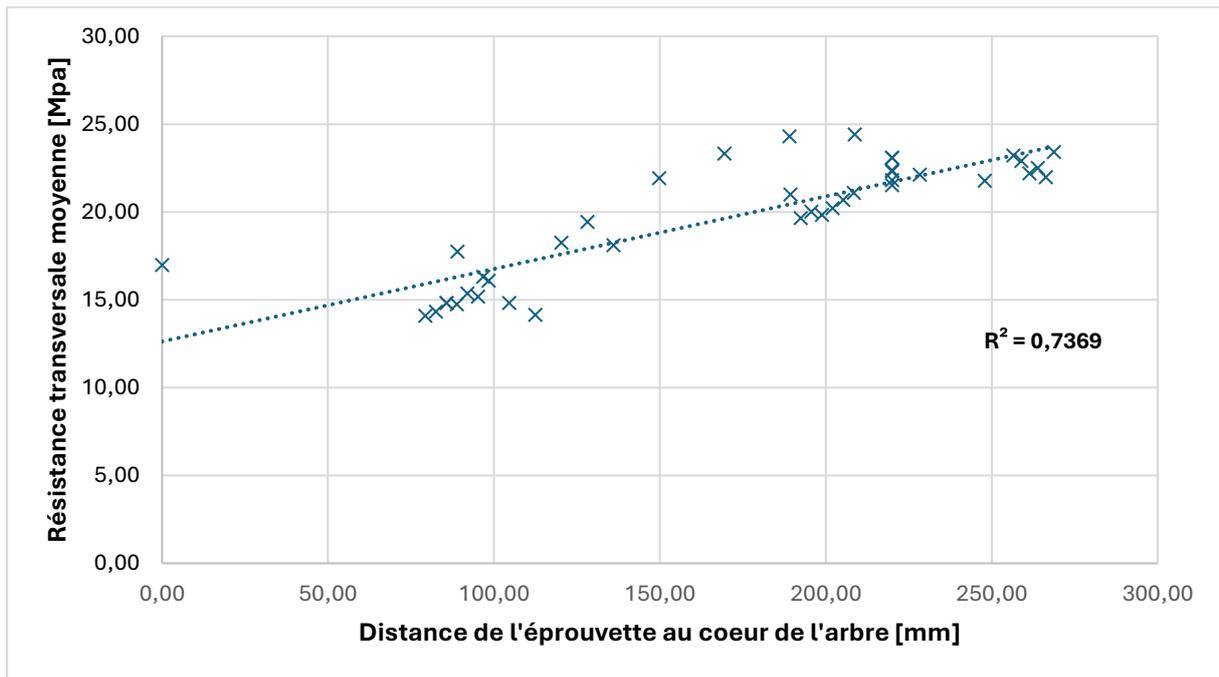


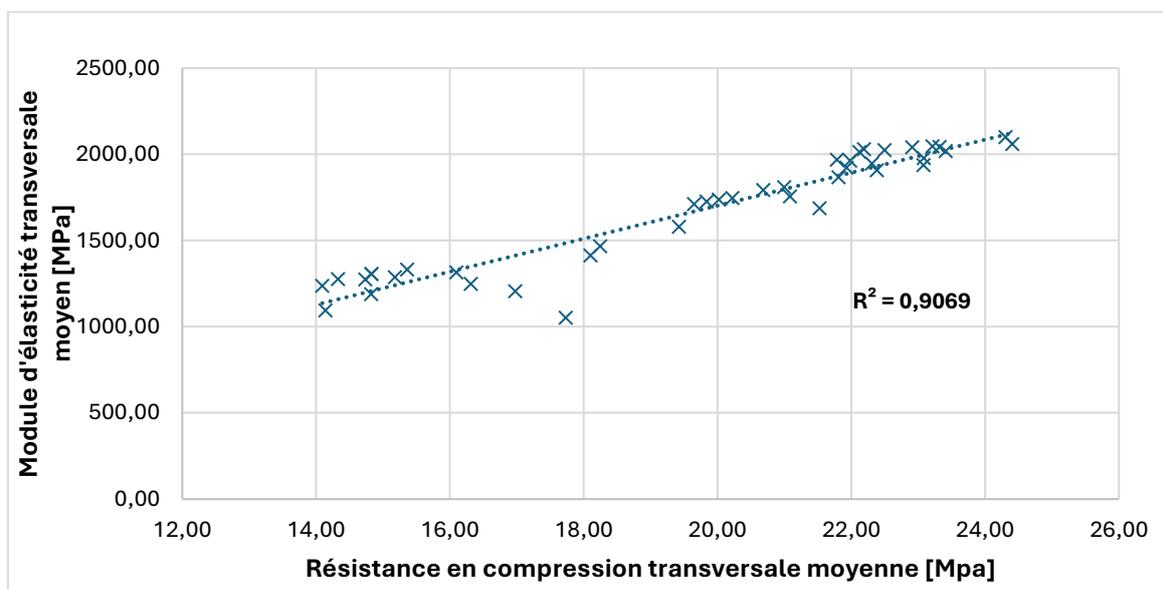
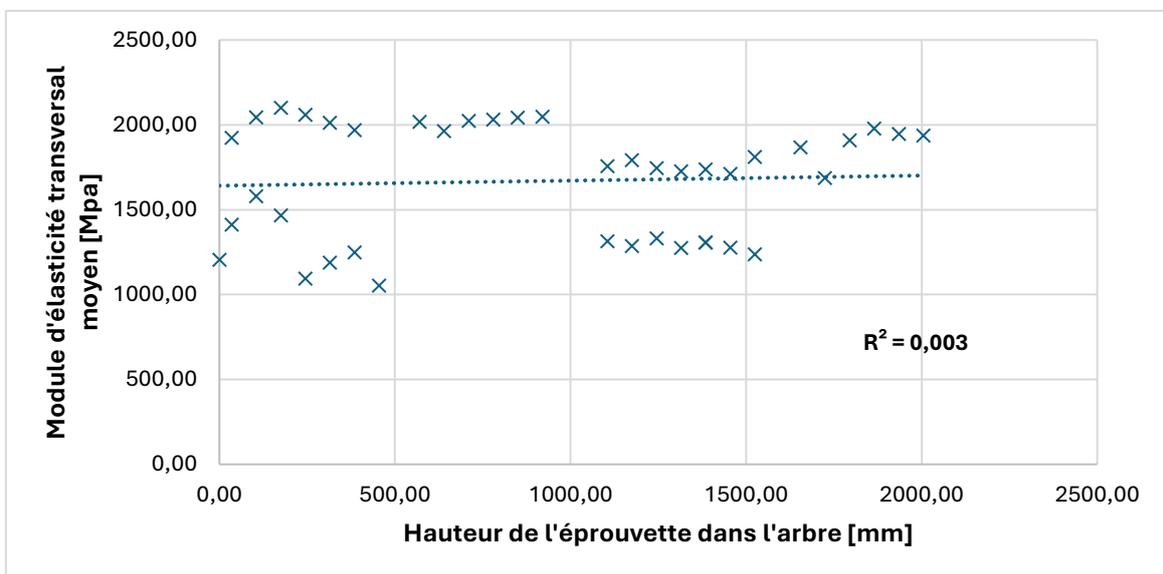
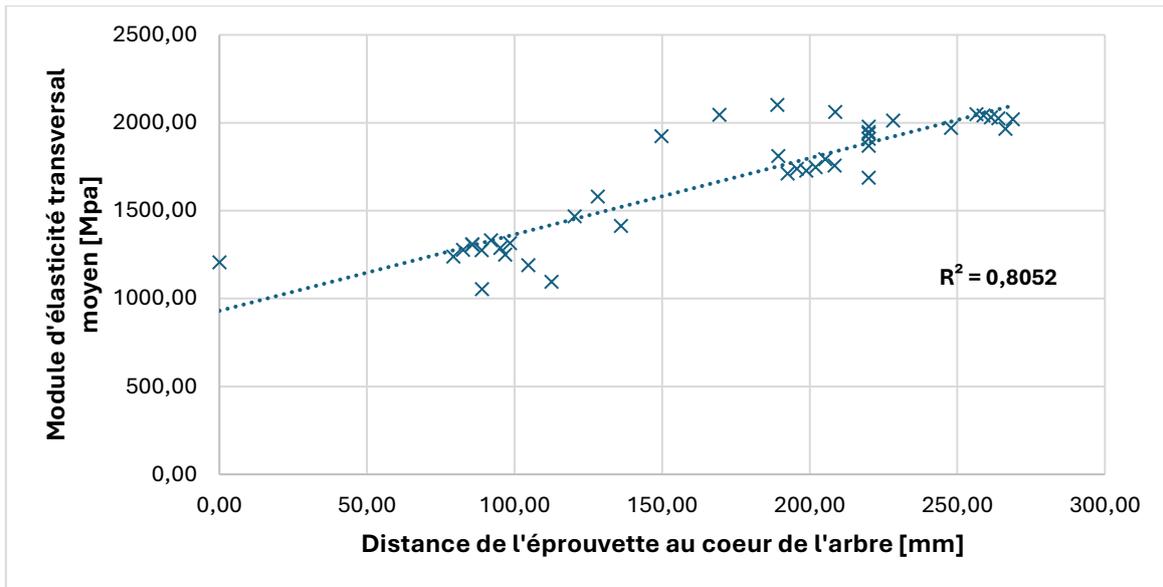
Essais de compression axiale :



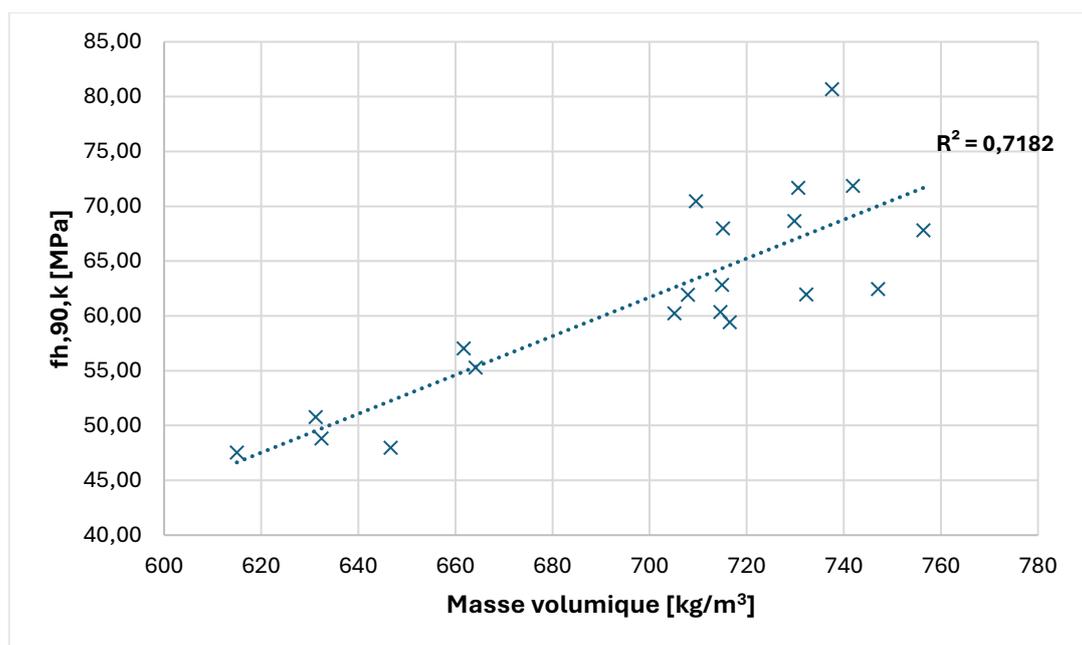
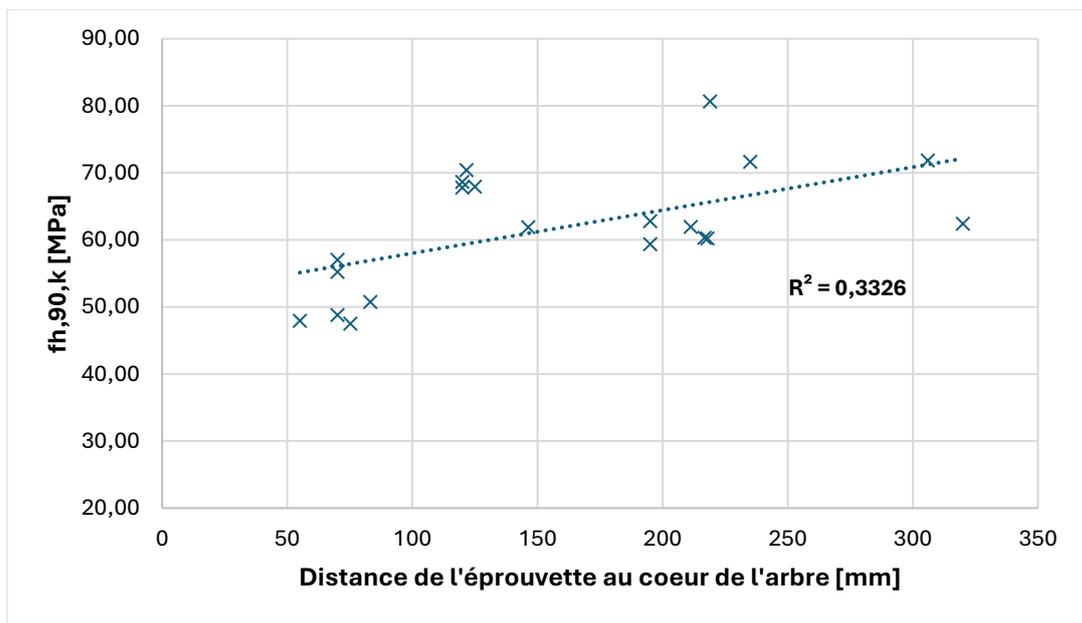
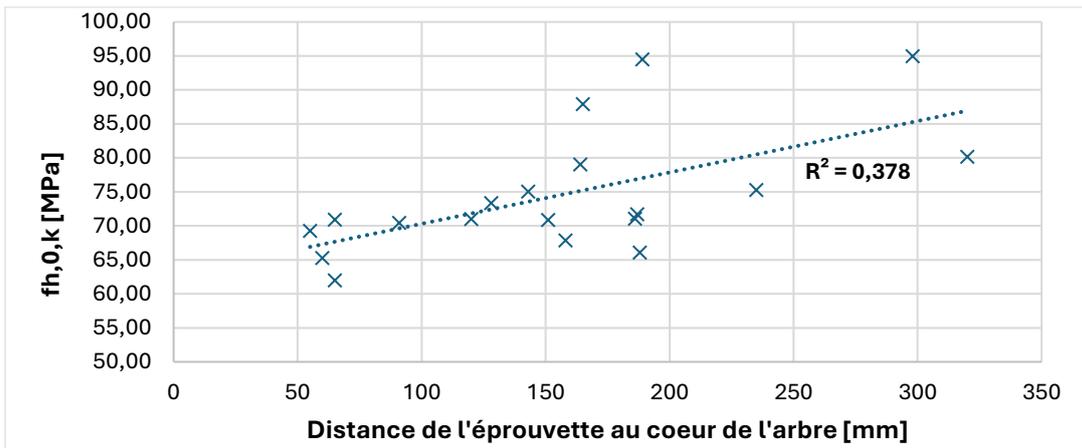


Essais de compression transversale :



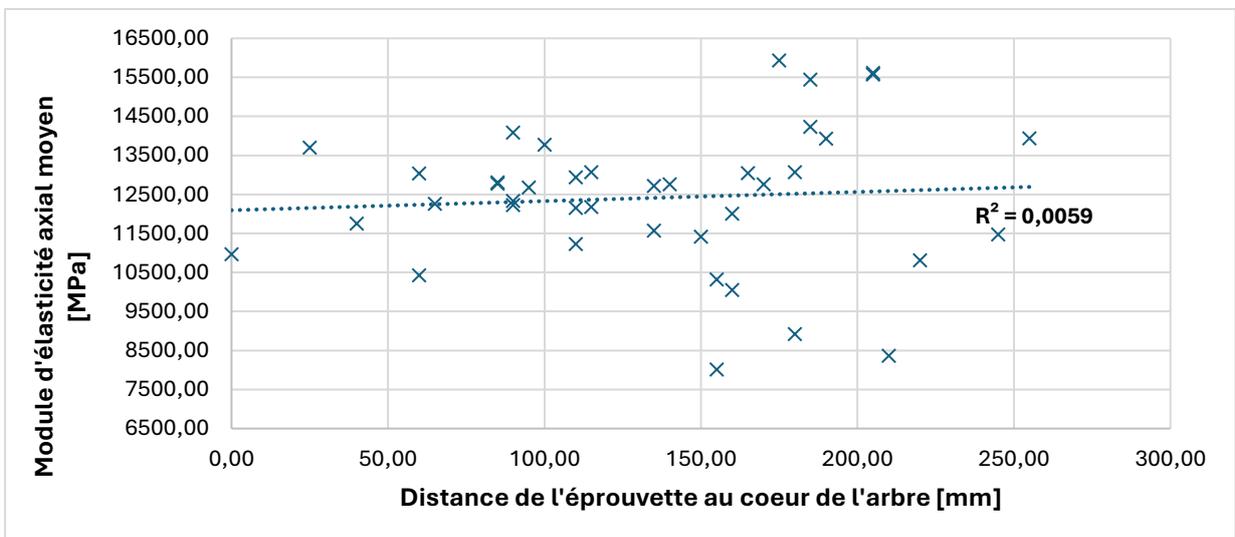
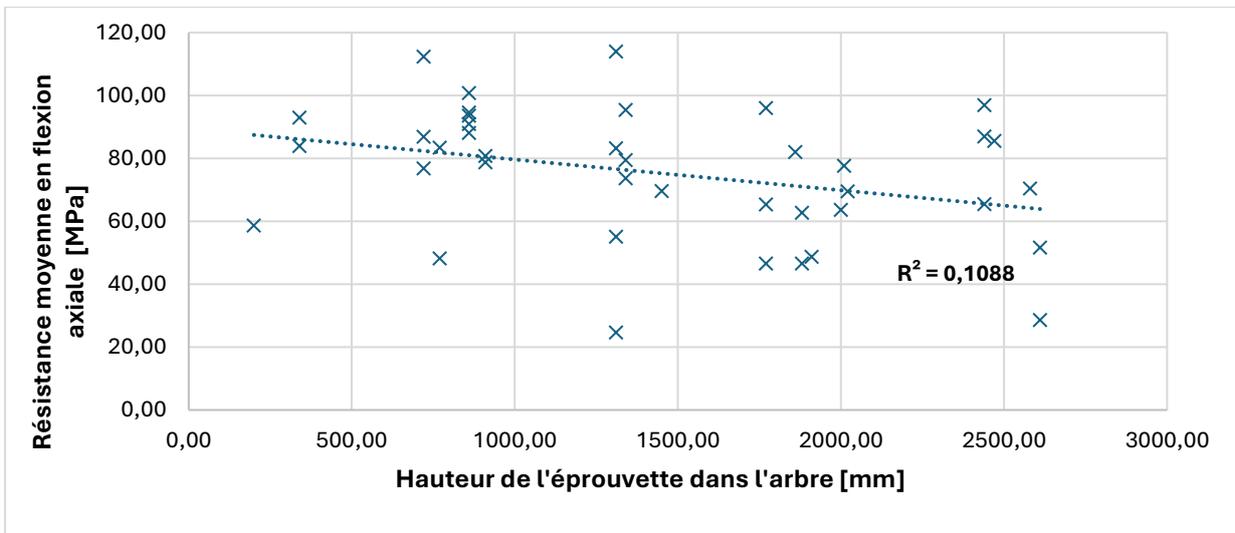
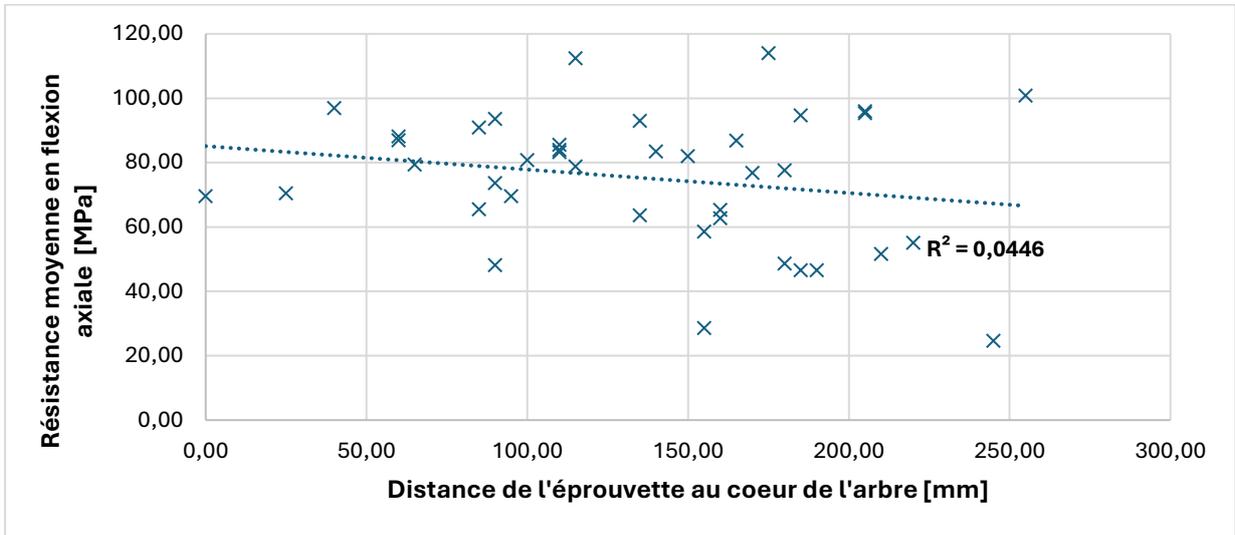


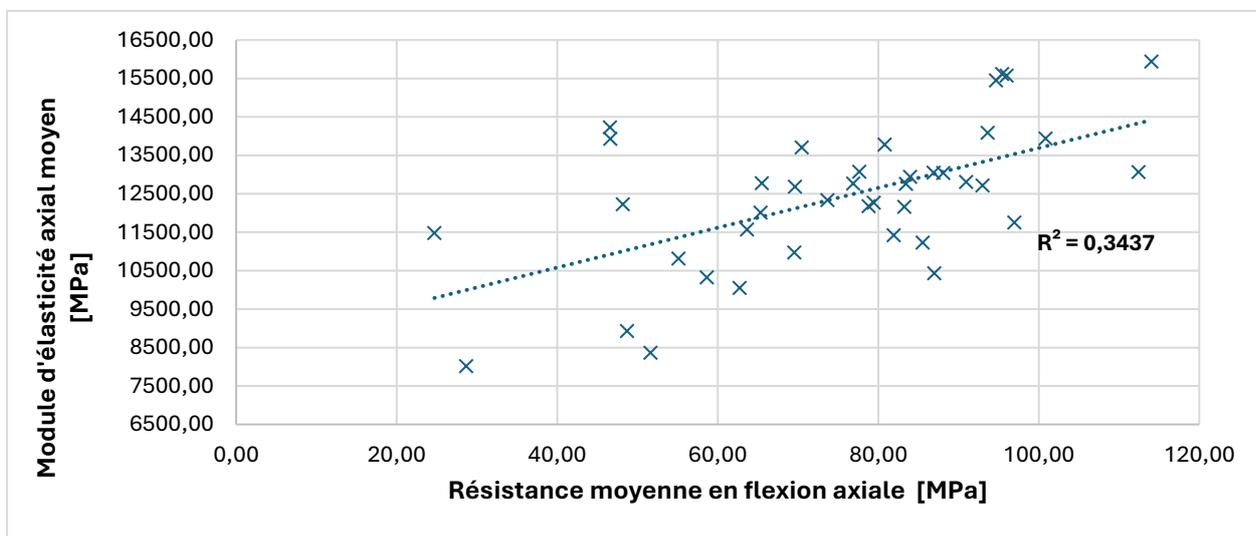
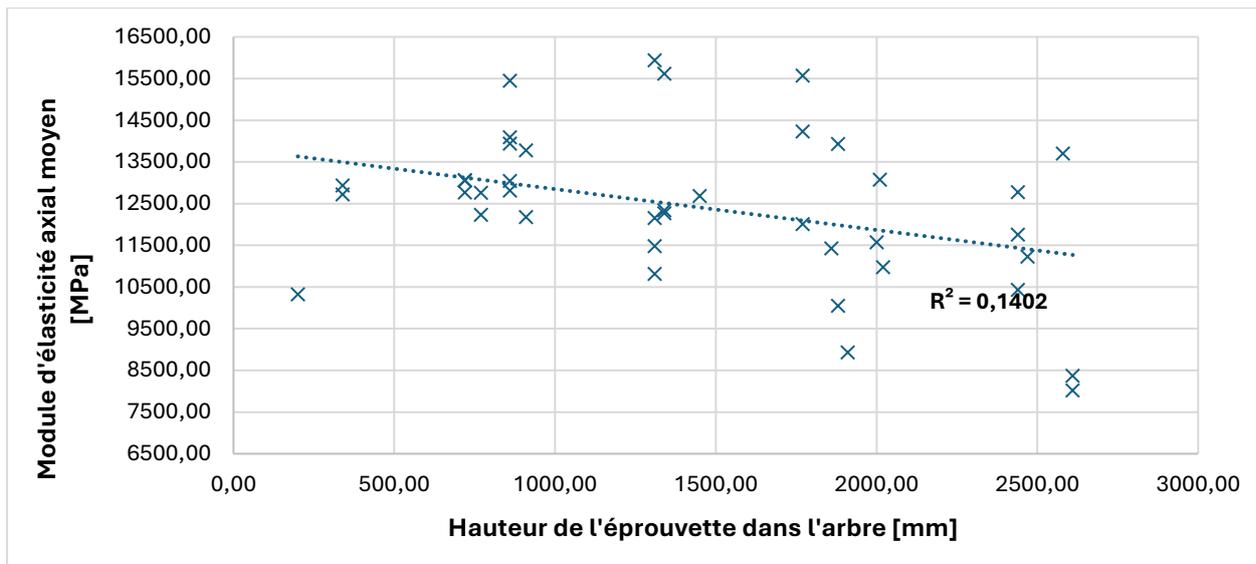
Essais de portance locale :



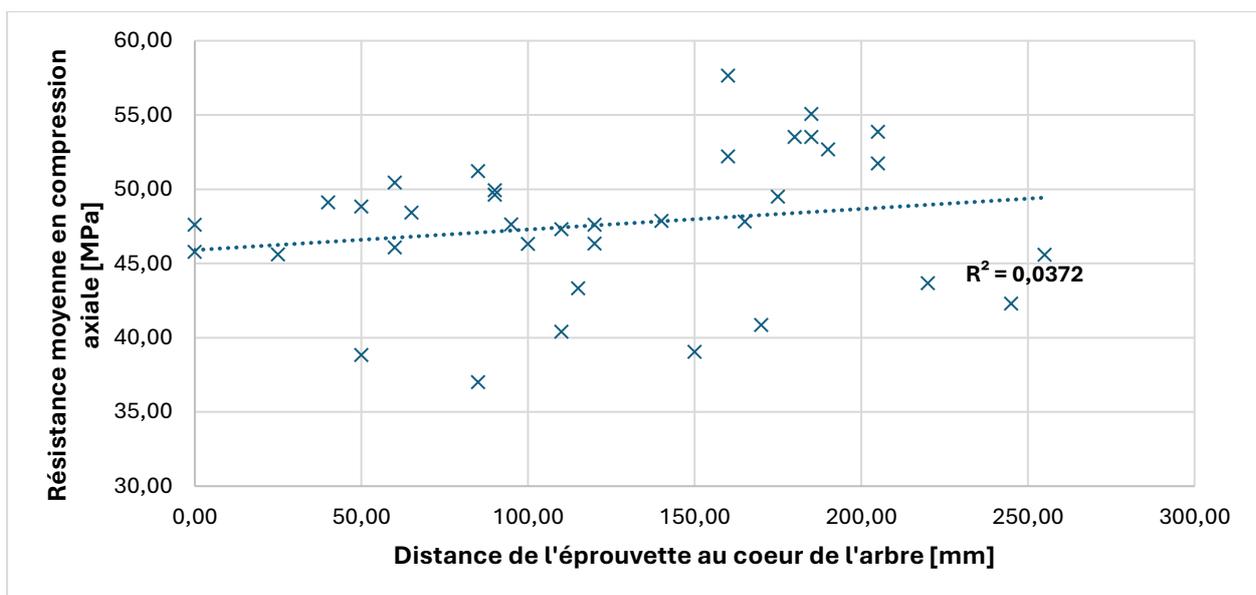
GOMMIER BLANC

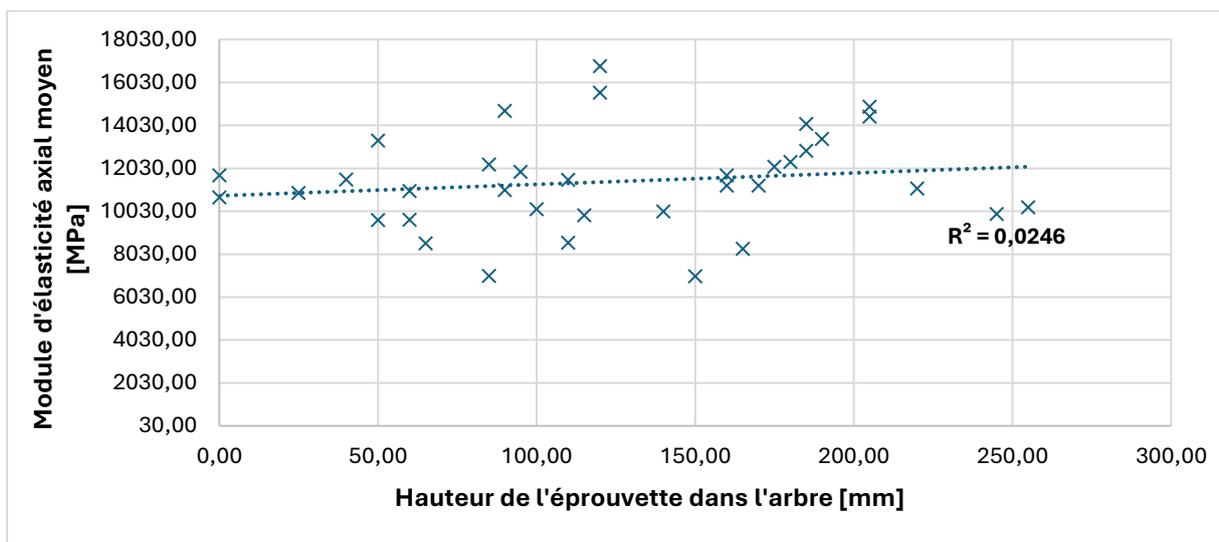
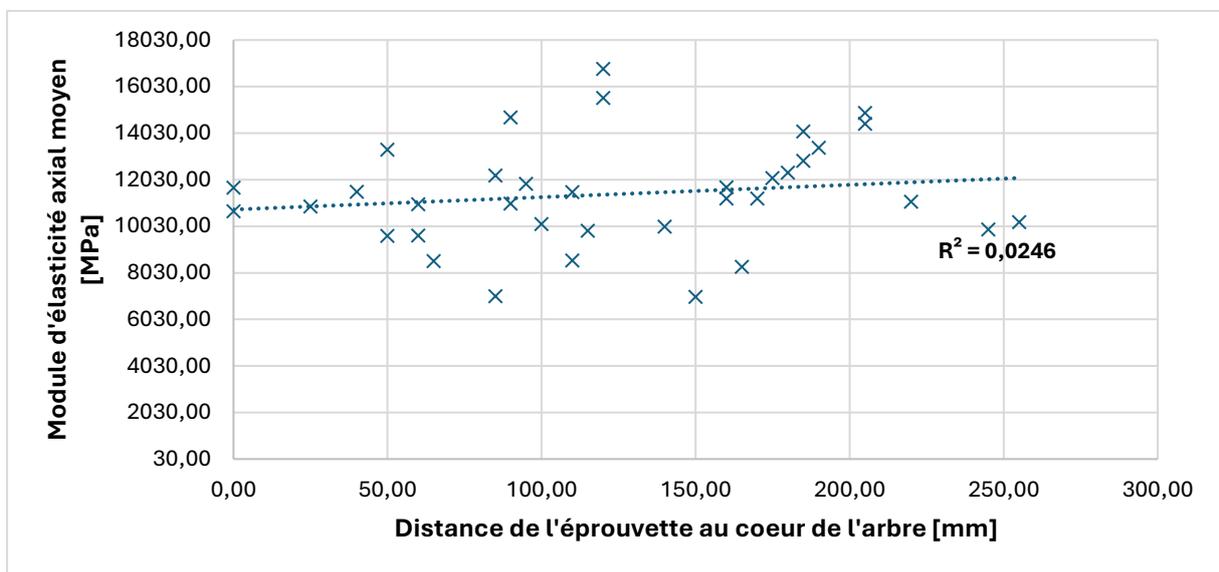
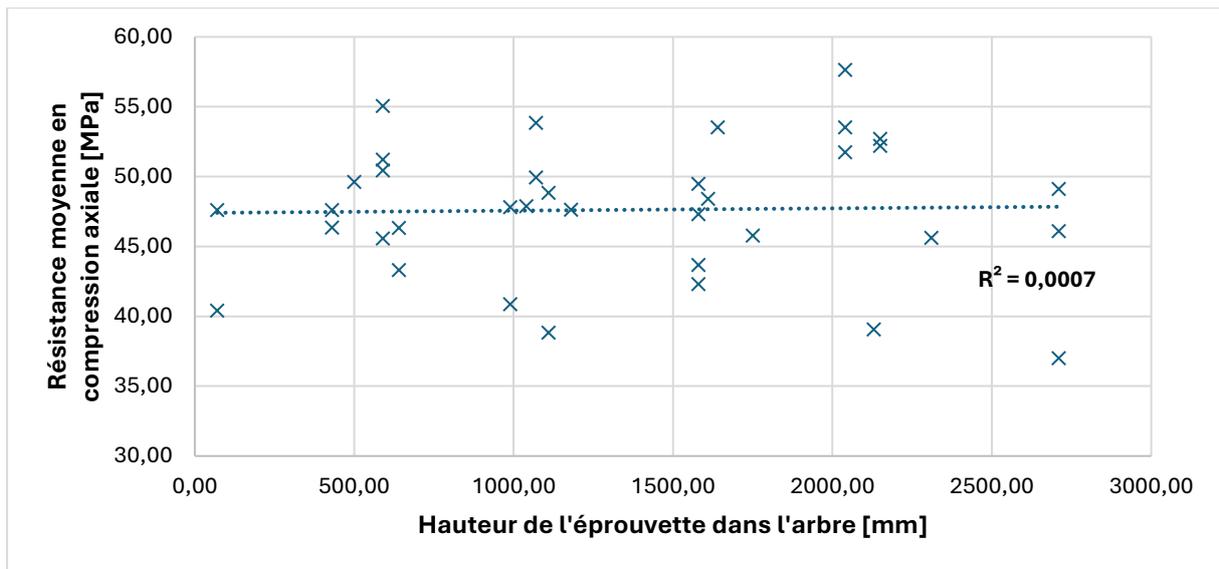
Essais de flexion :

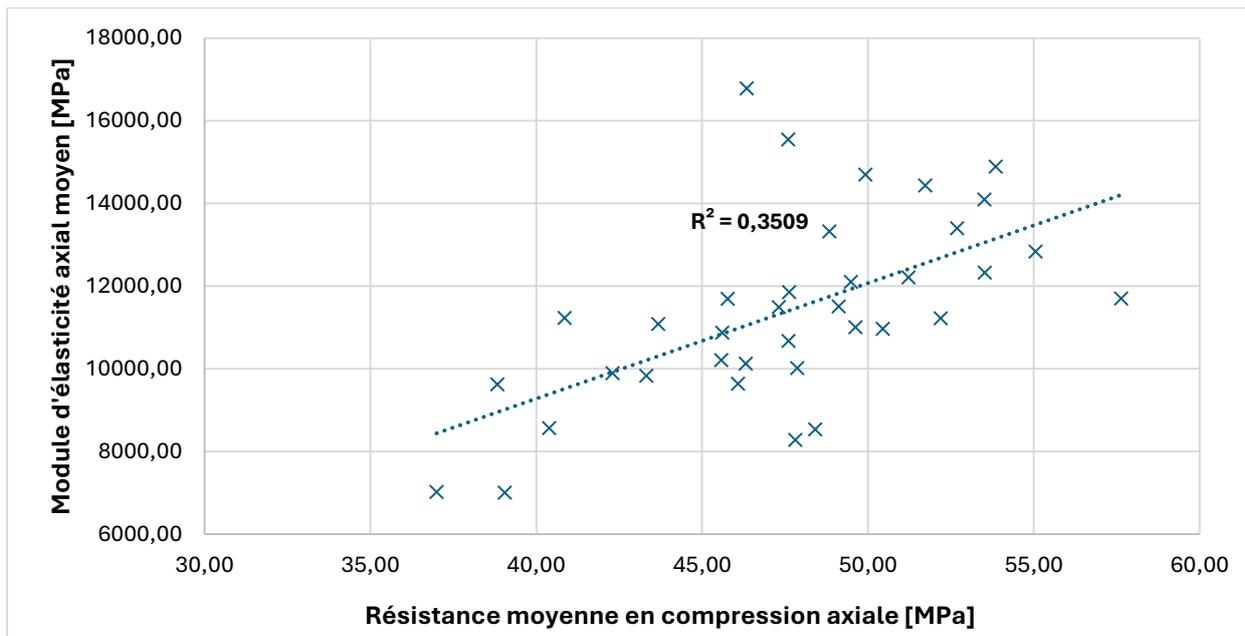




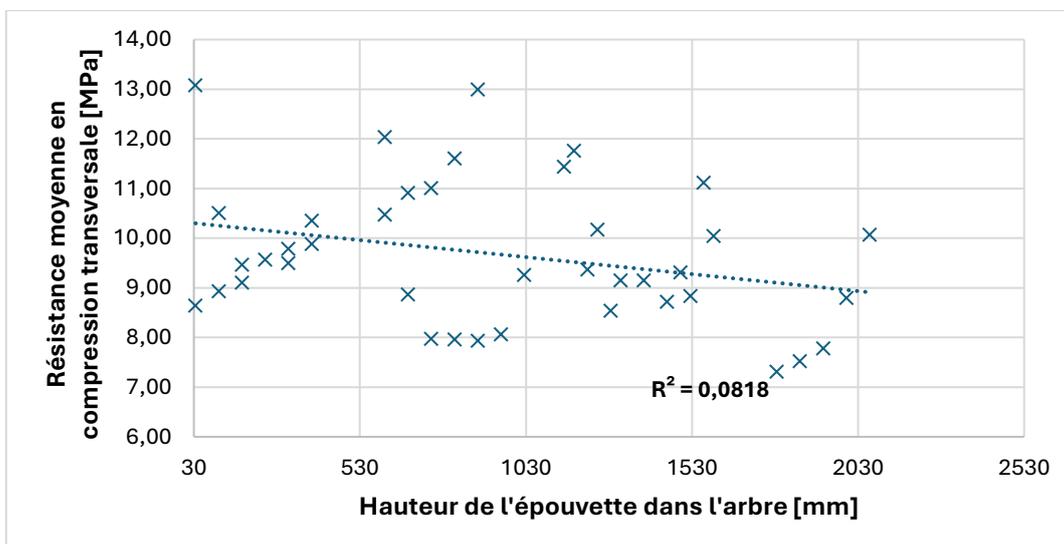
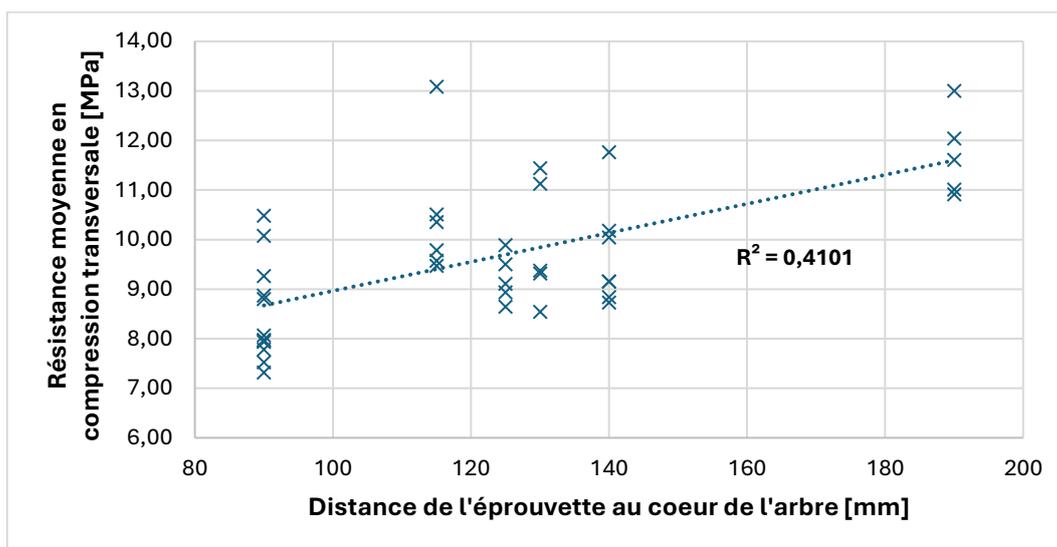
Essais de compression axiale :

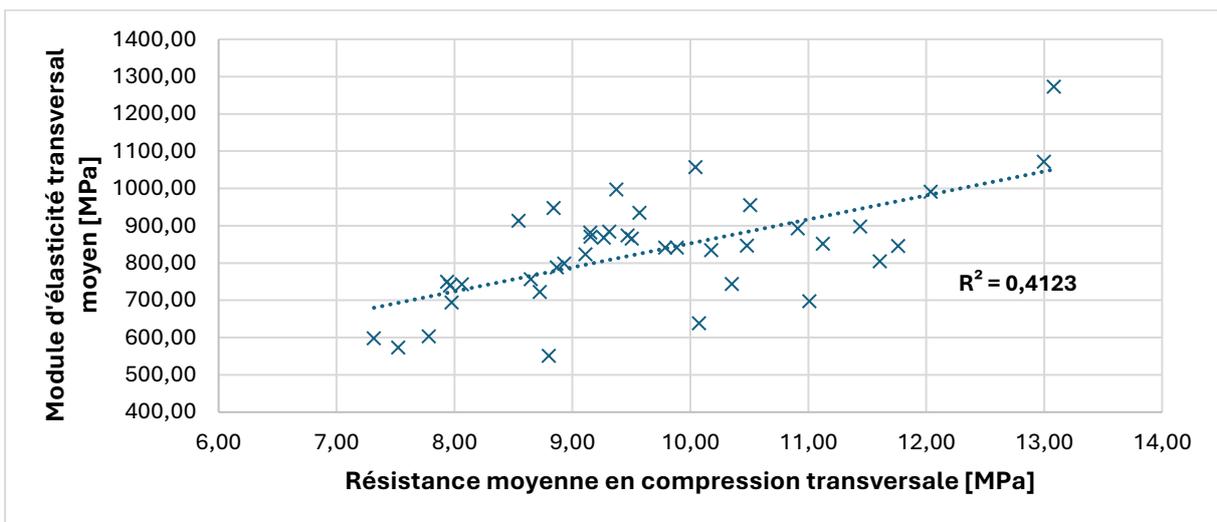
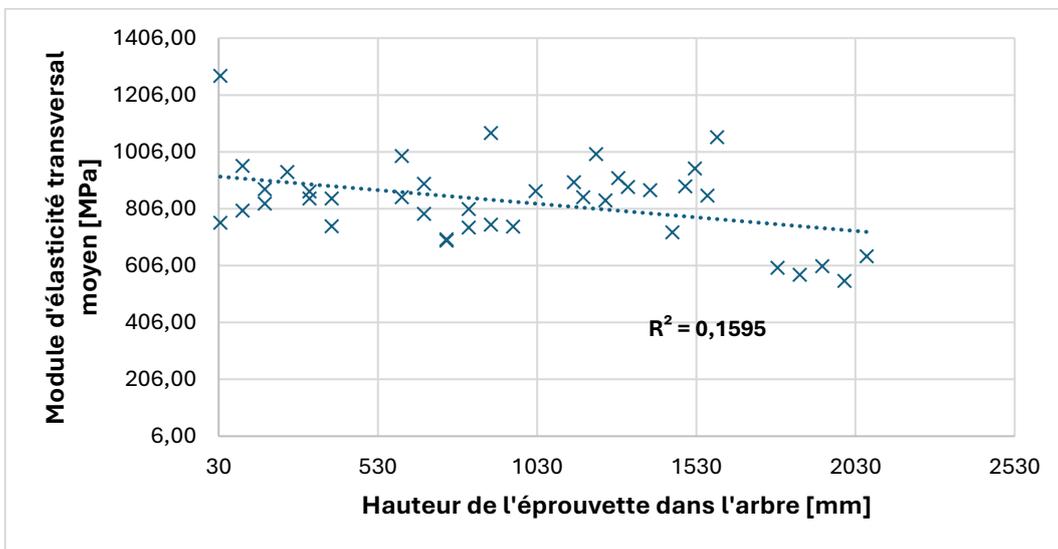
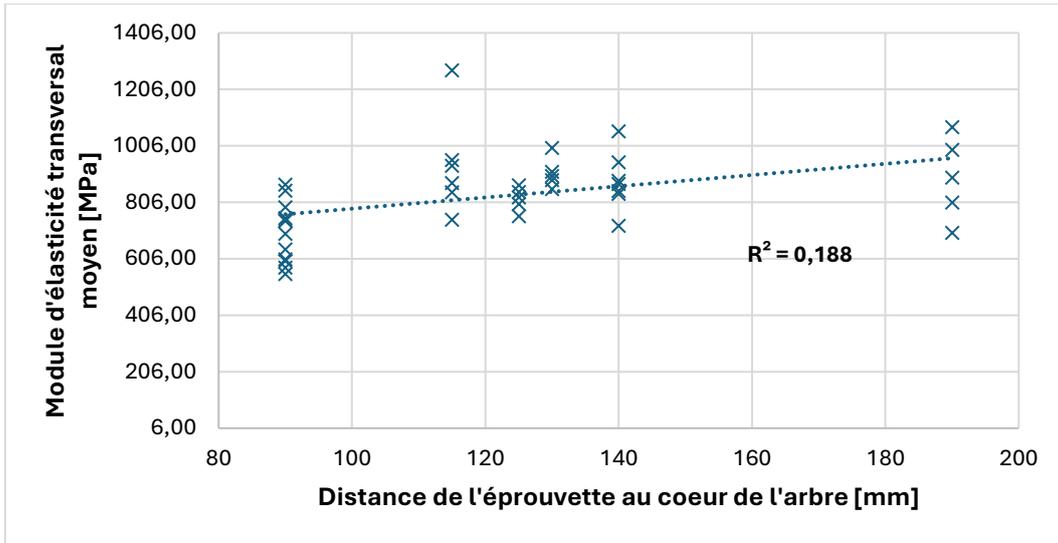




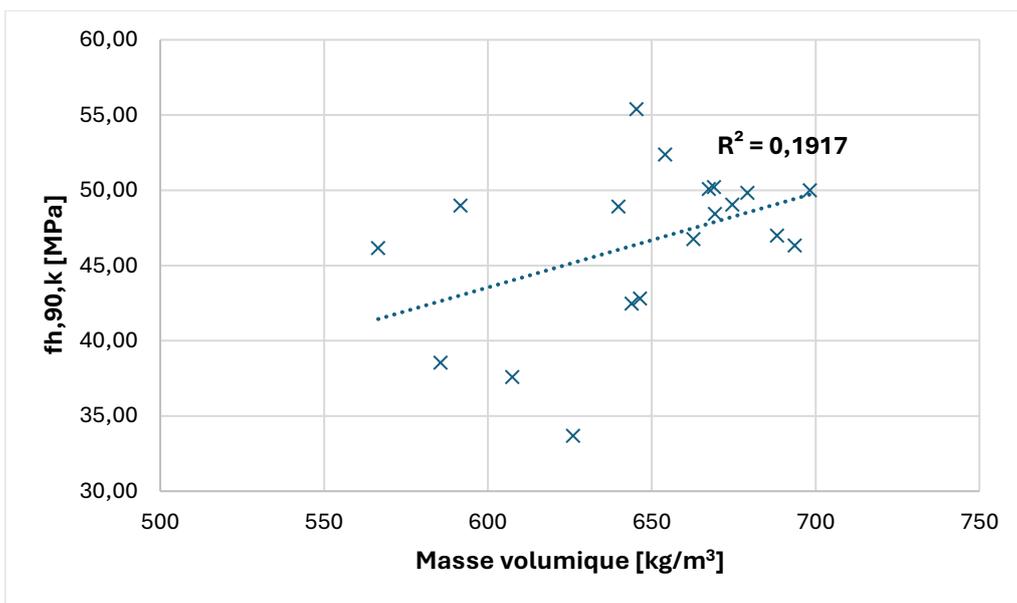
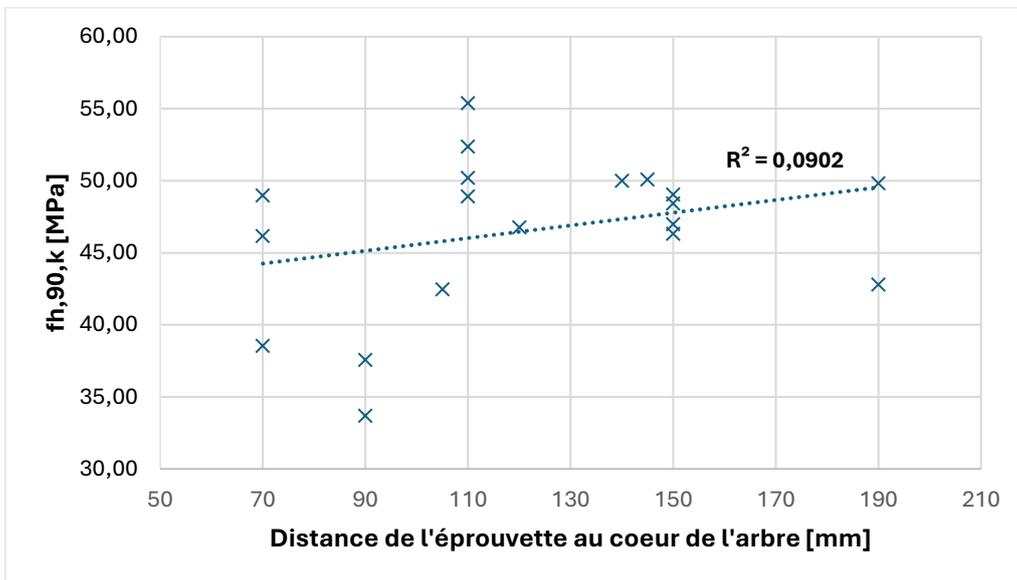
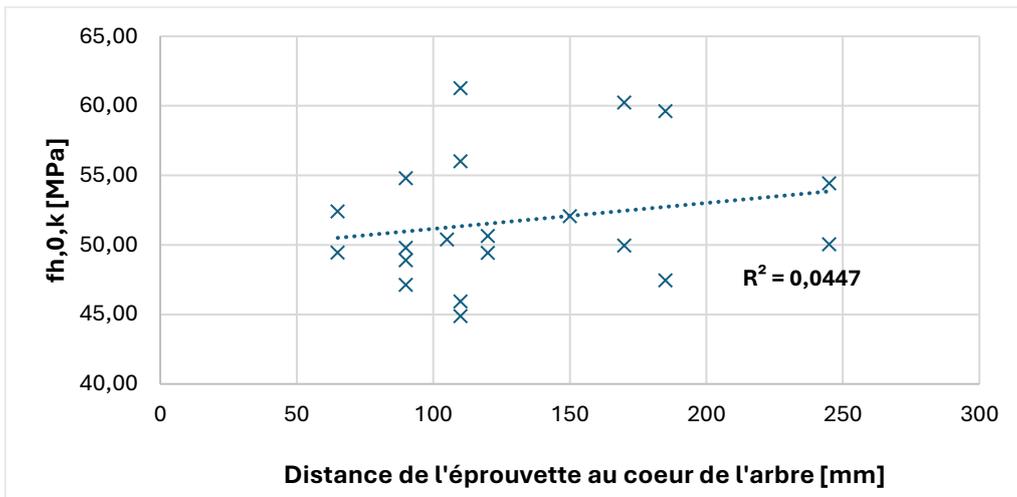


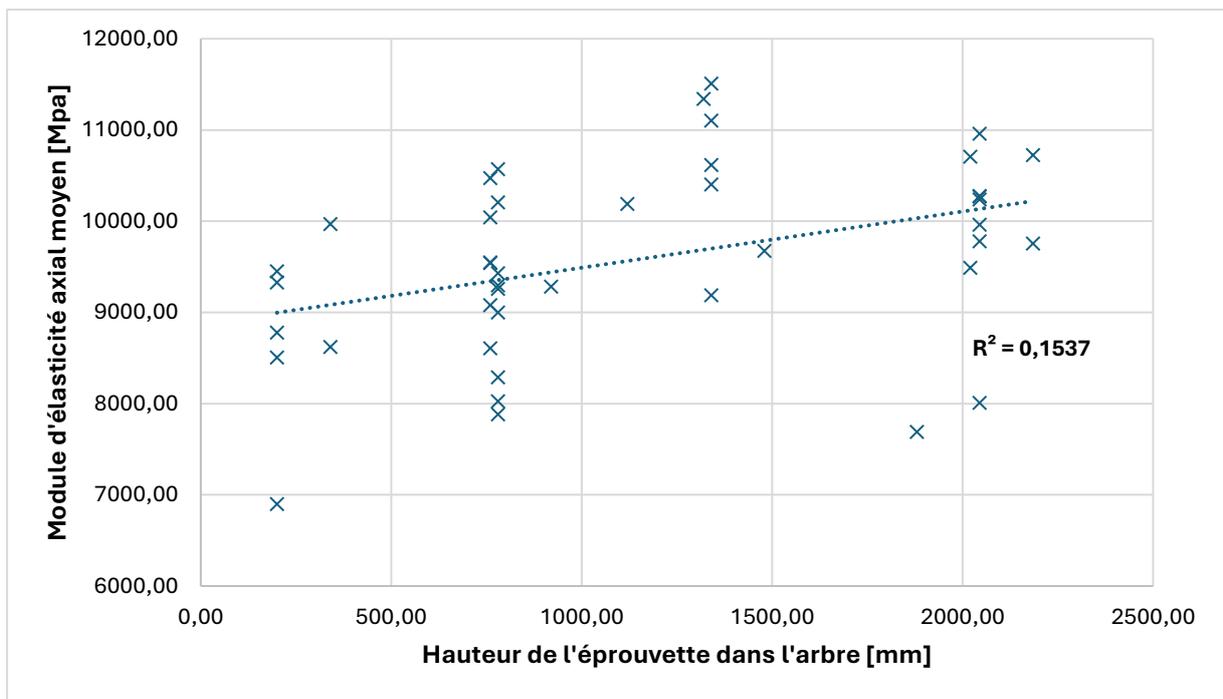
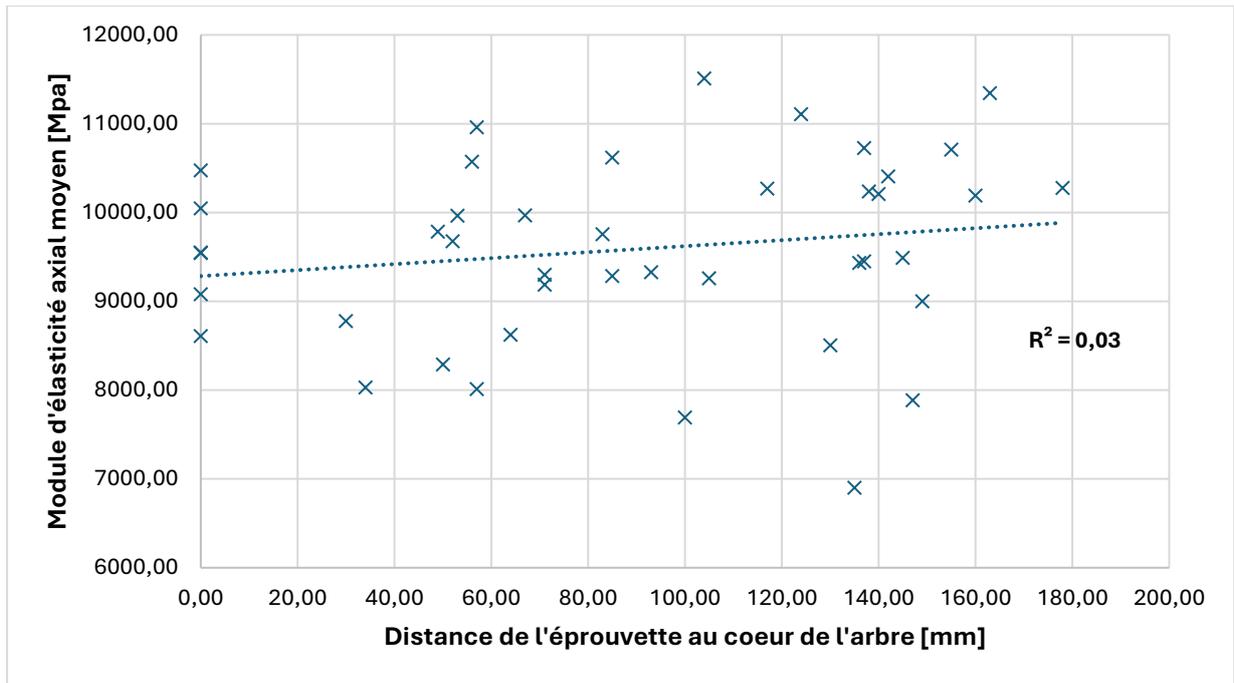
Essais de compression transversale :

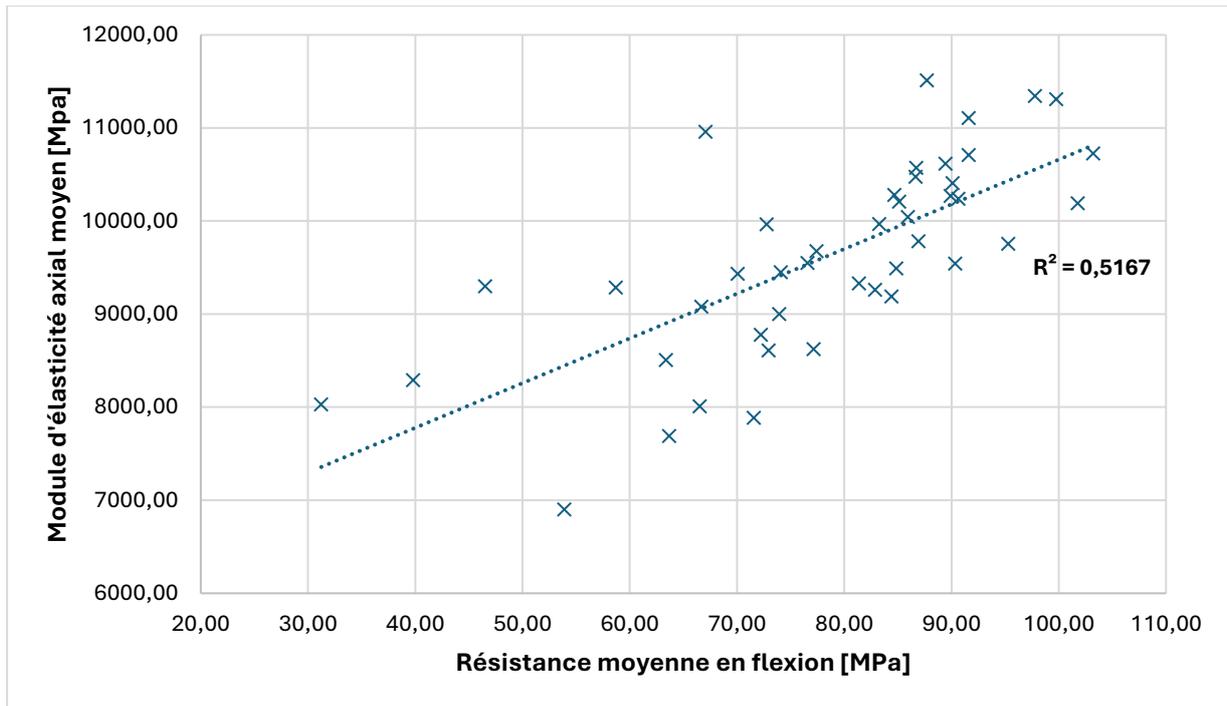




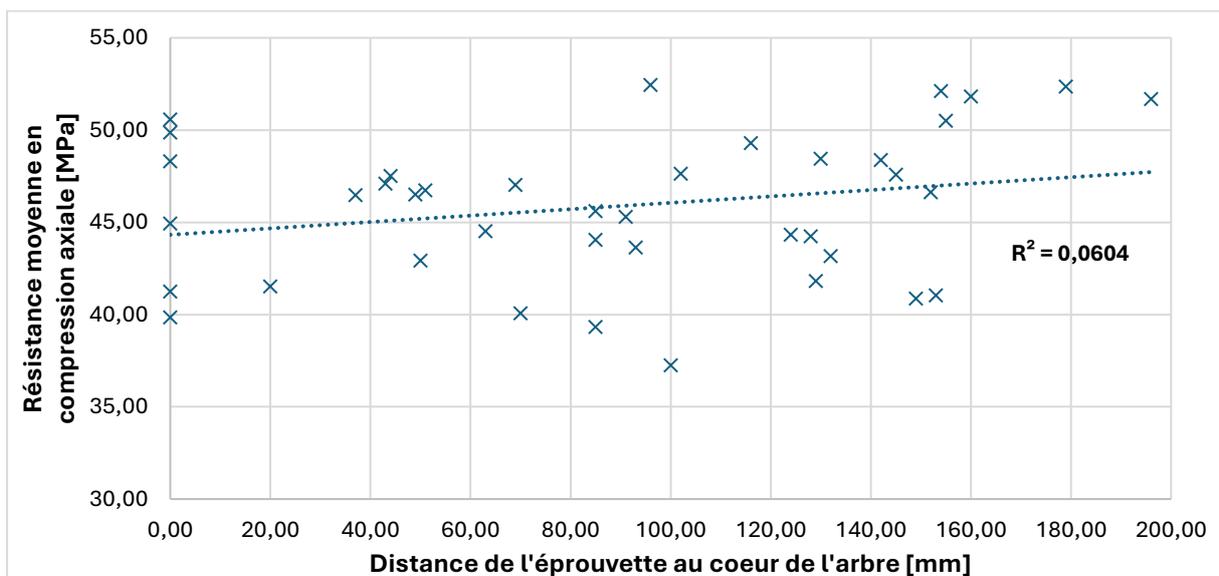
Essais de portance locale :

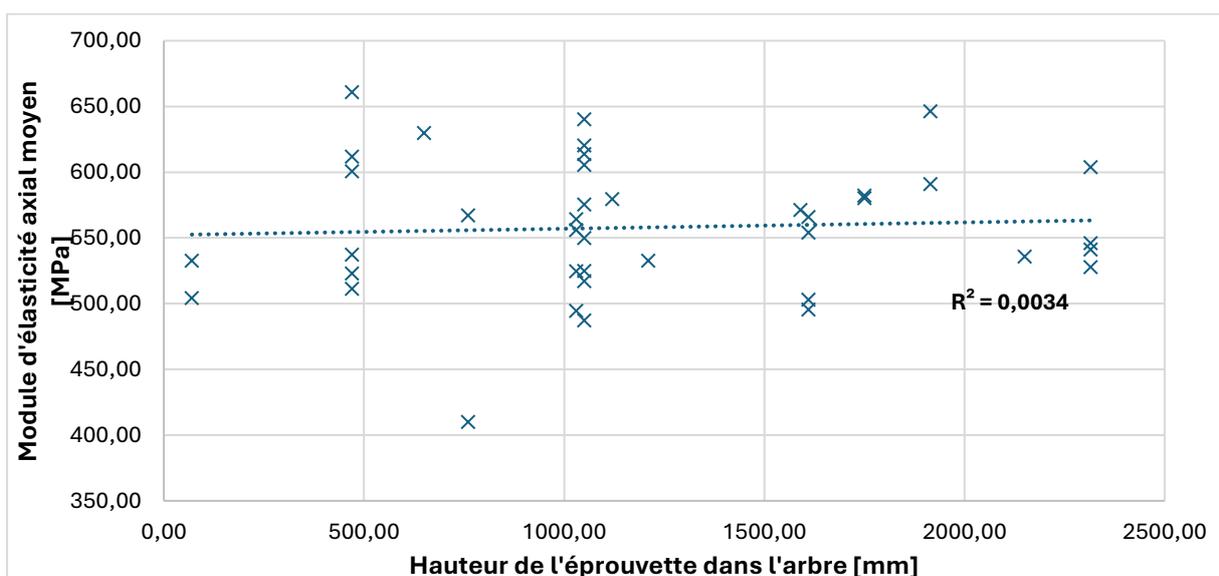
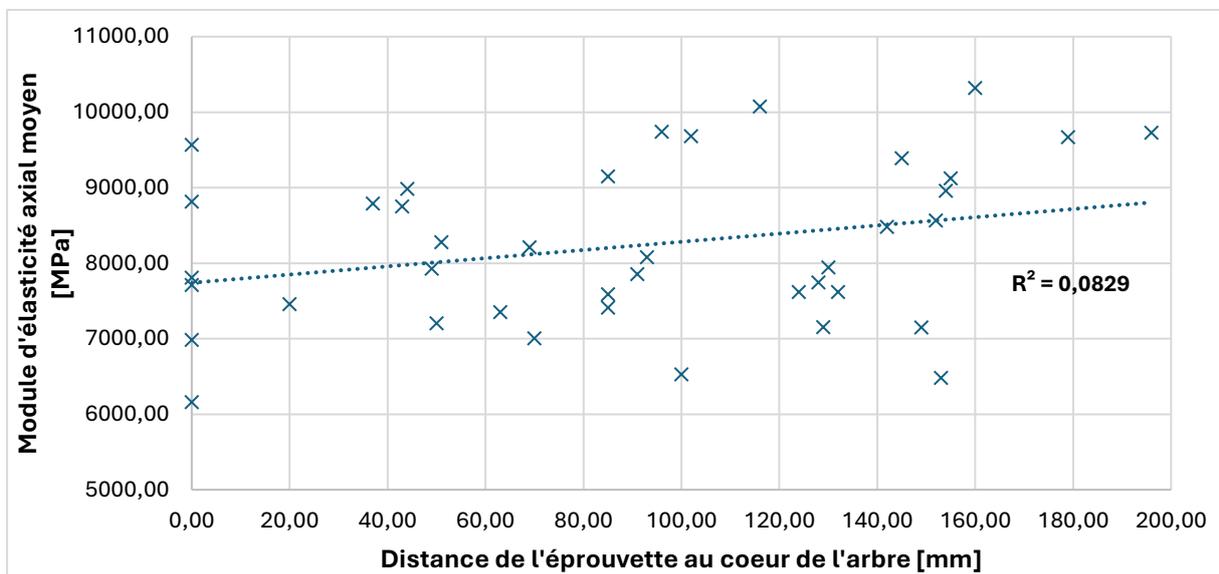
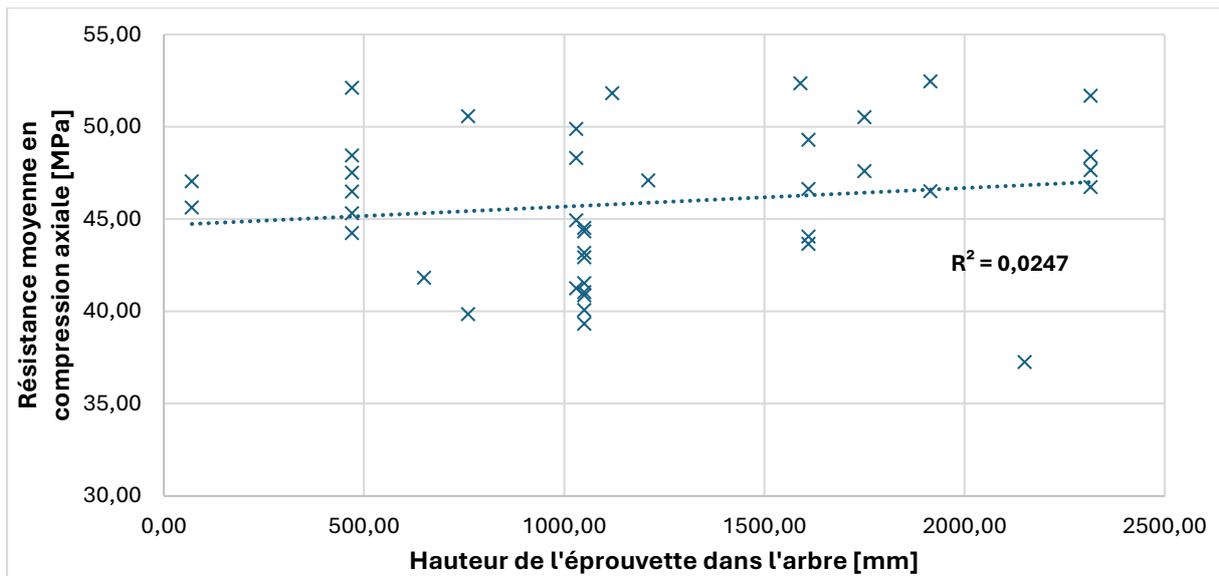


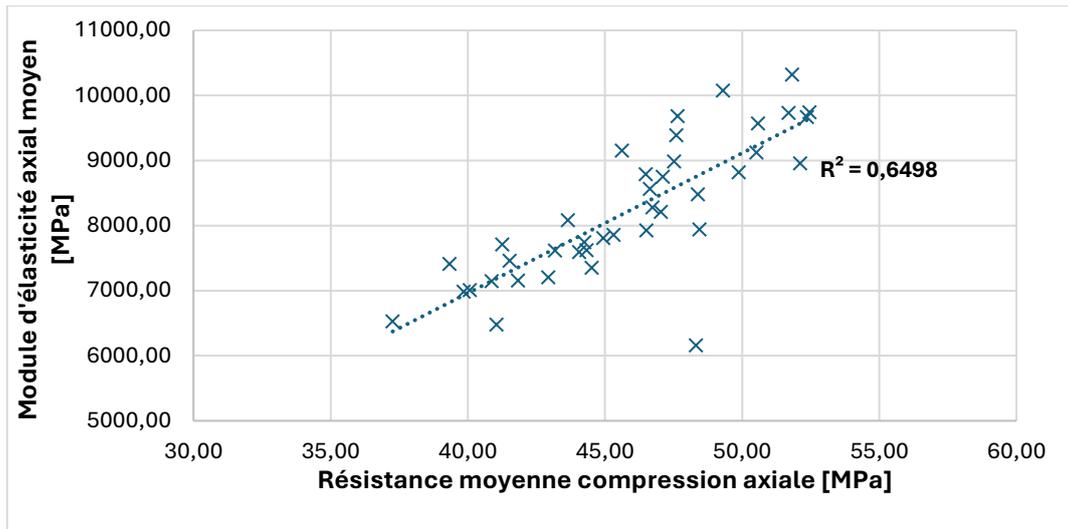




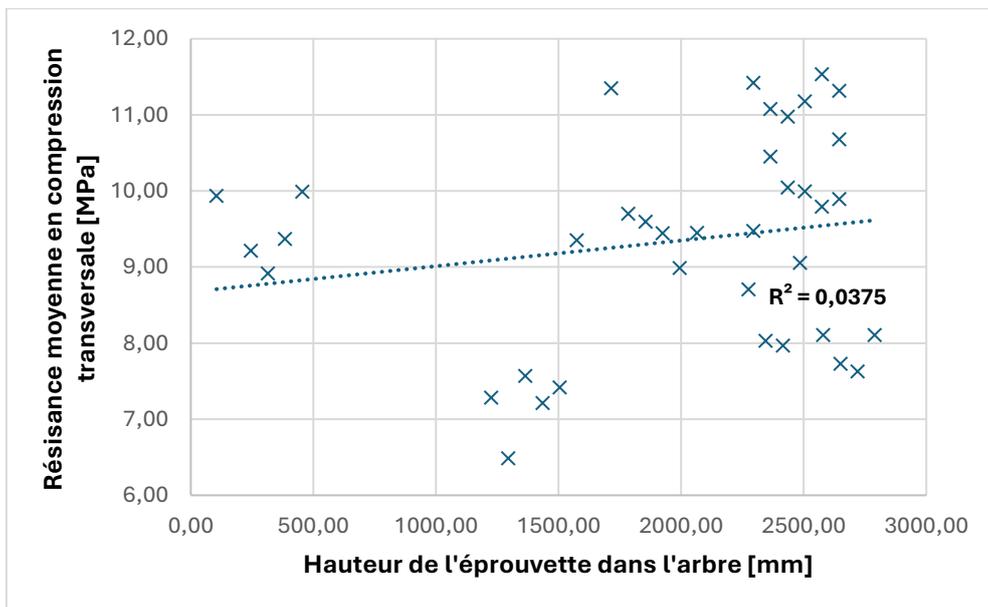
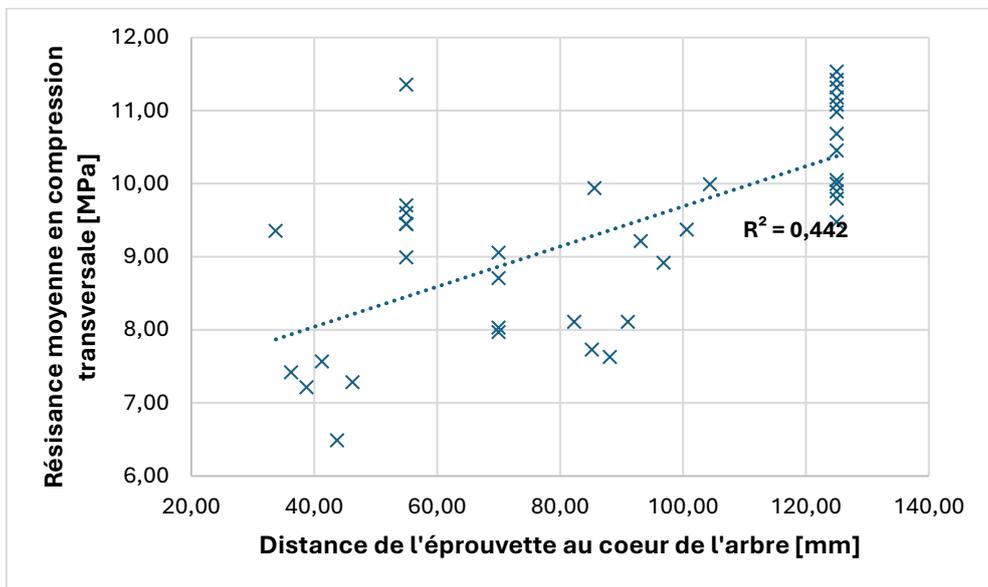
Essais de compression axiale :

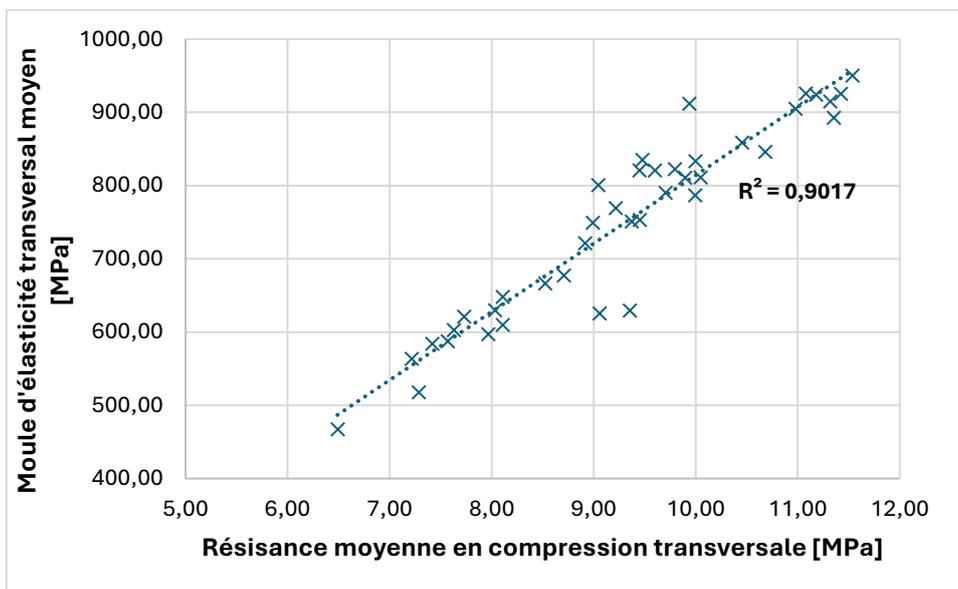
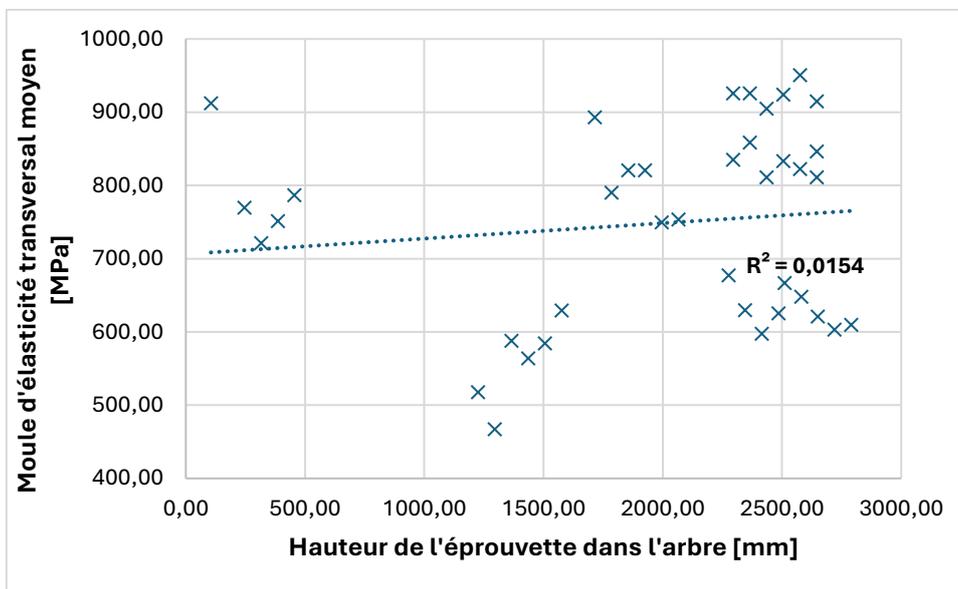
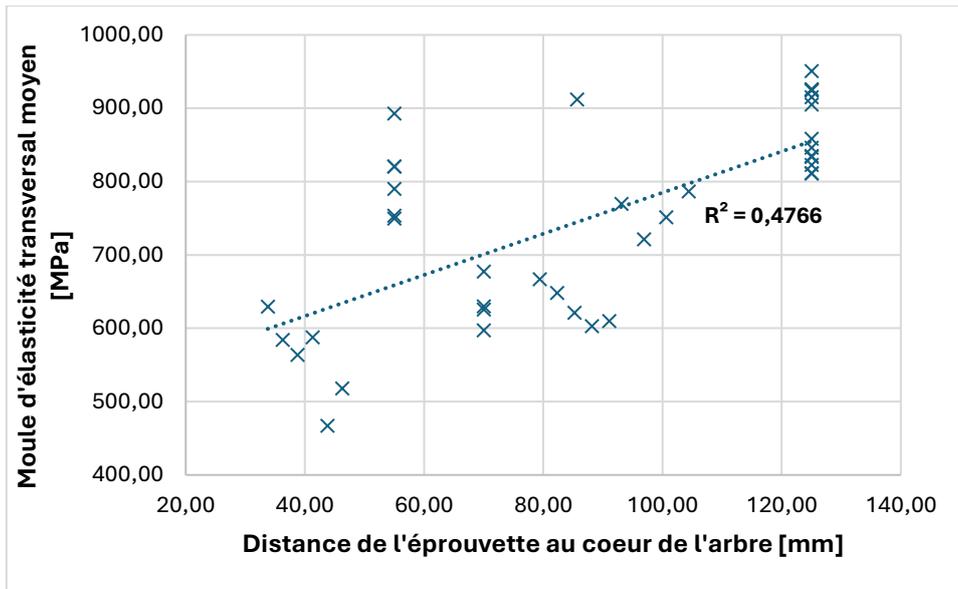




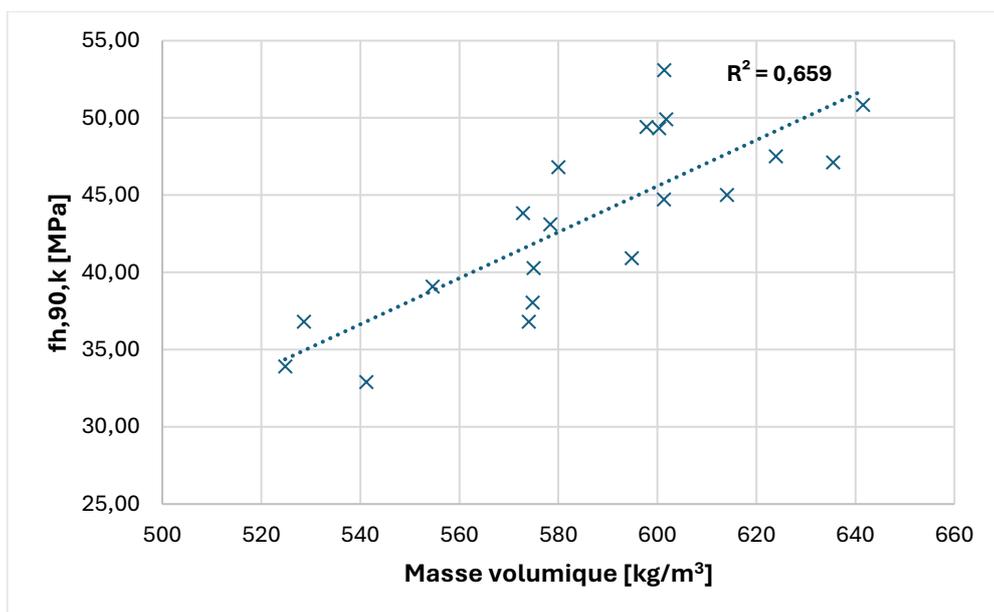
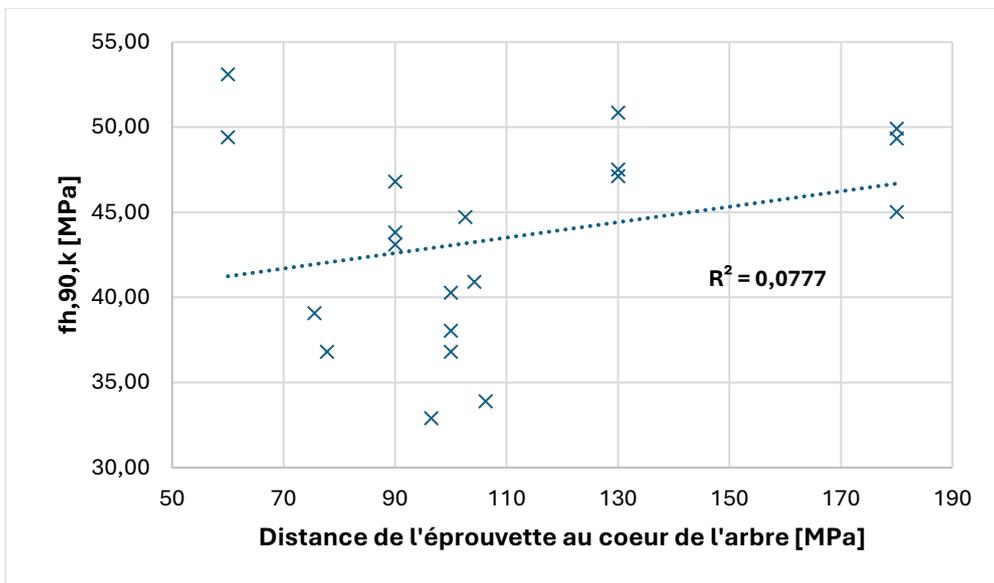
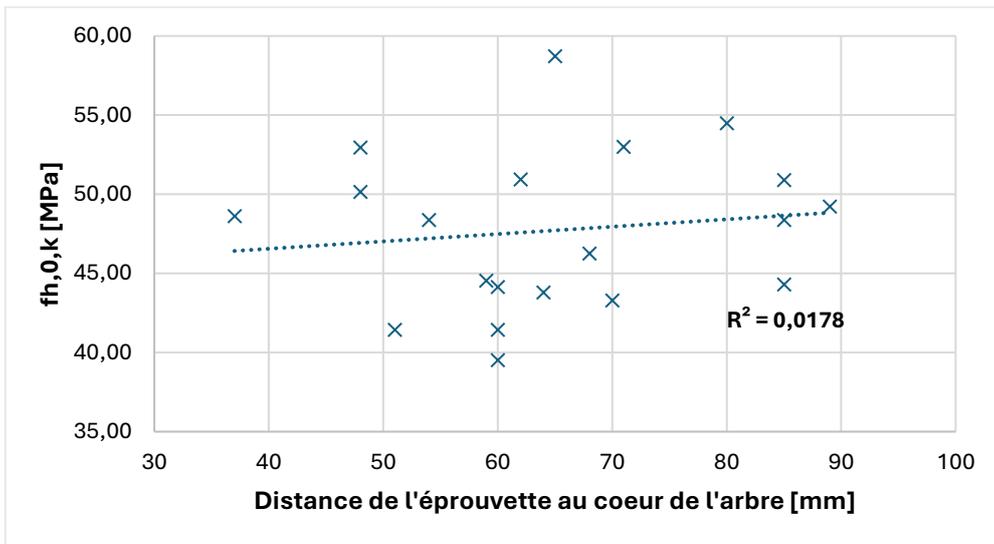


Essais de compression transversale :



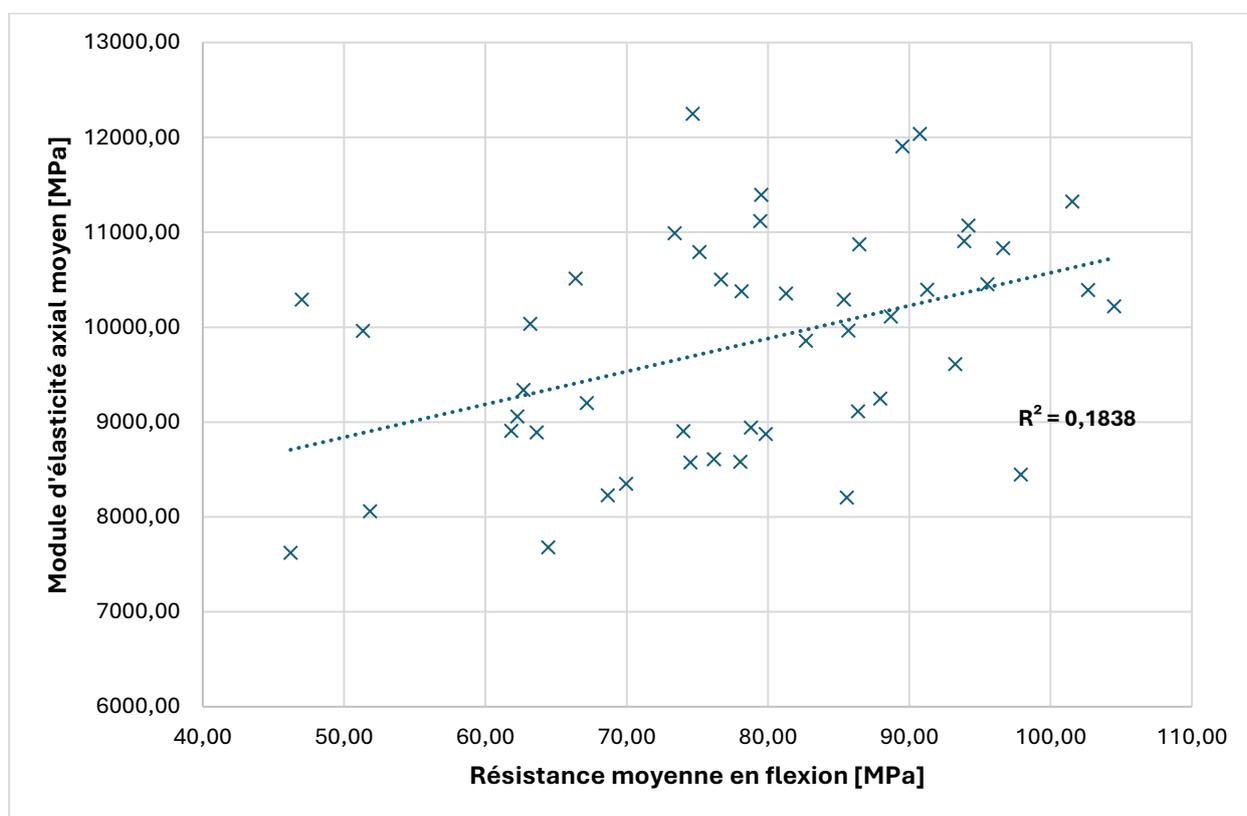
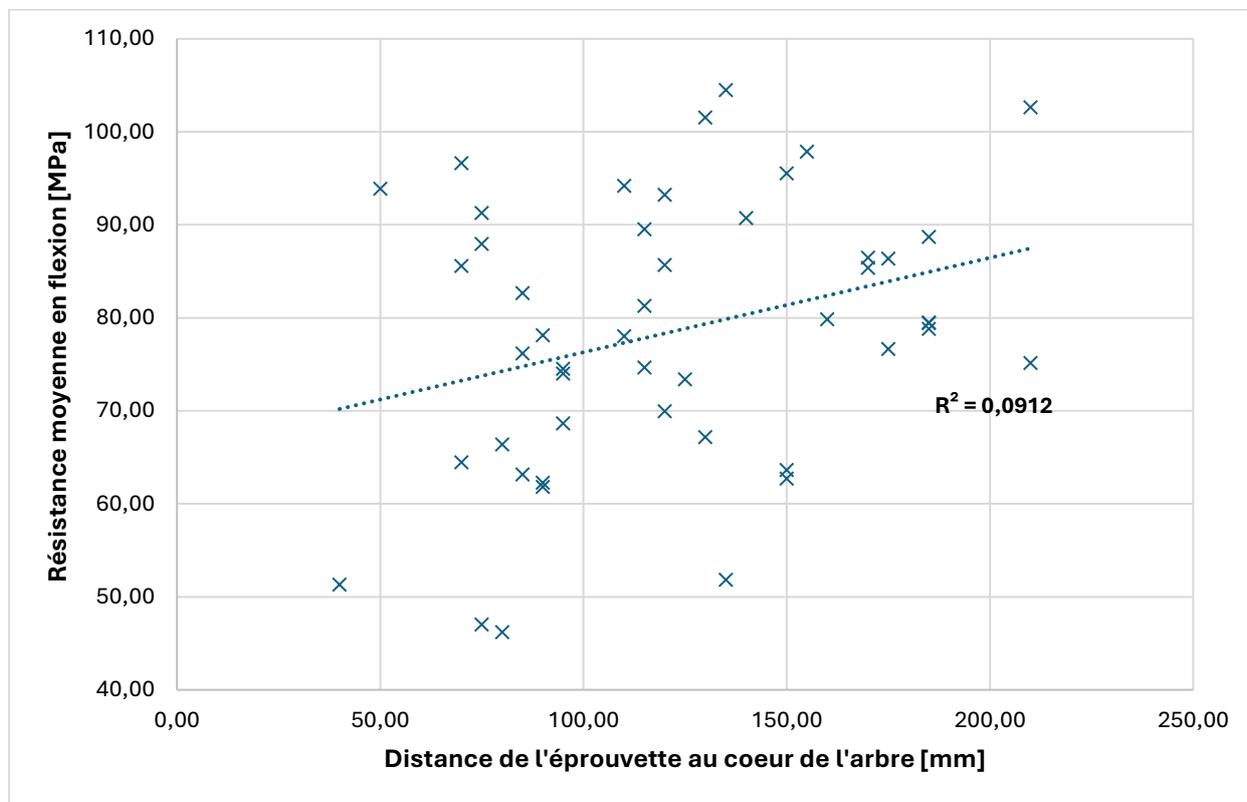


Essais de portance locale :

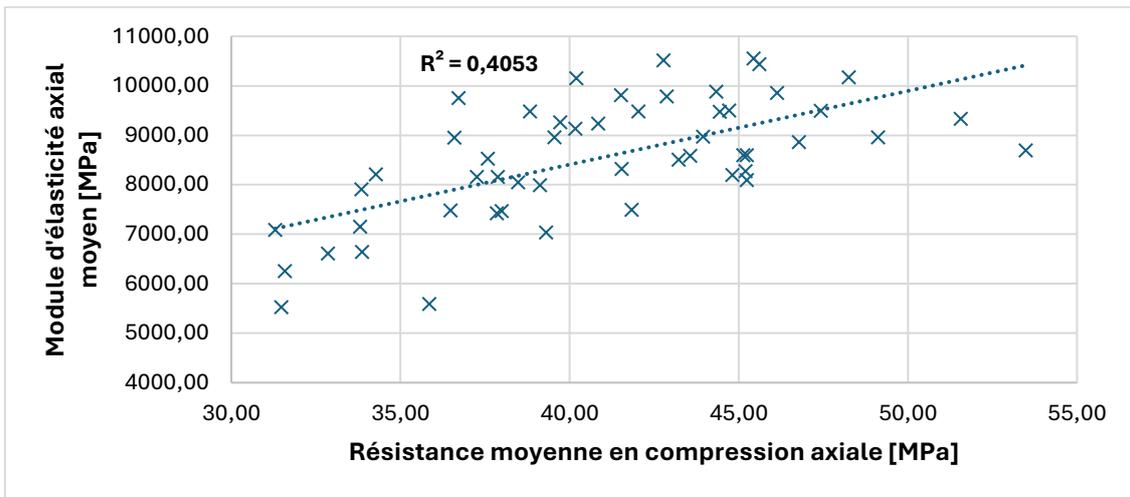


MAHOGANY A GRANDES FEUILLES

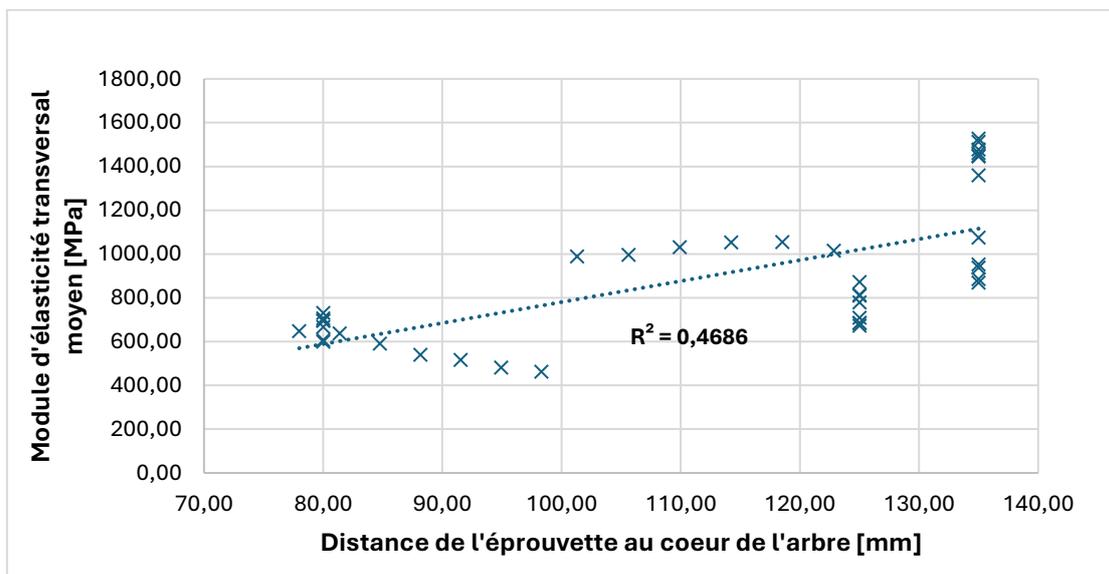
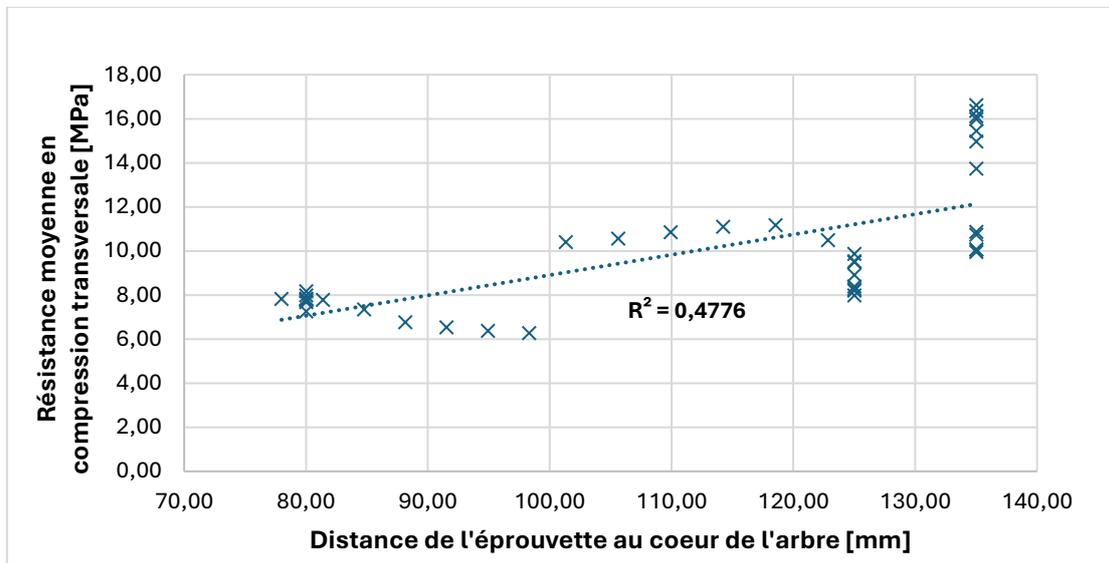
Essais de flexion :



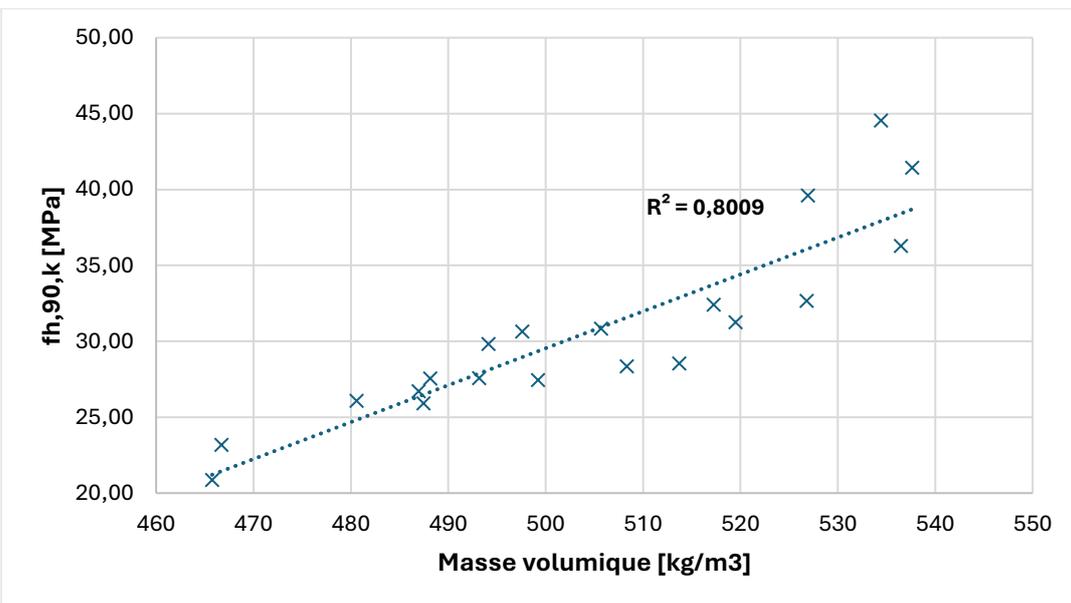
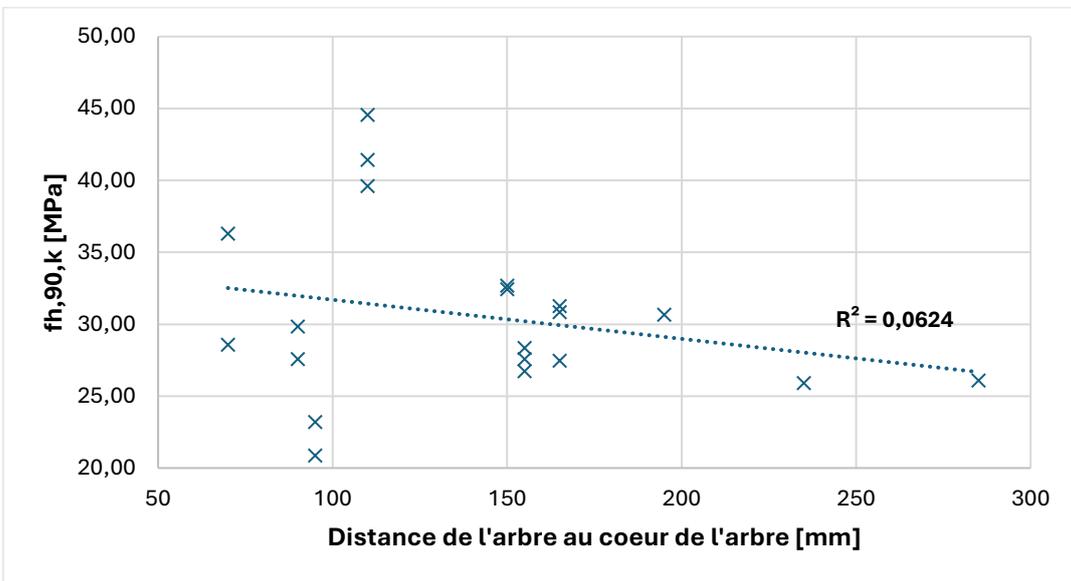
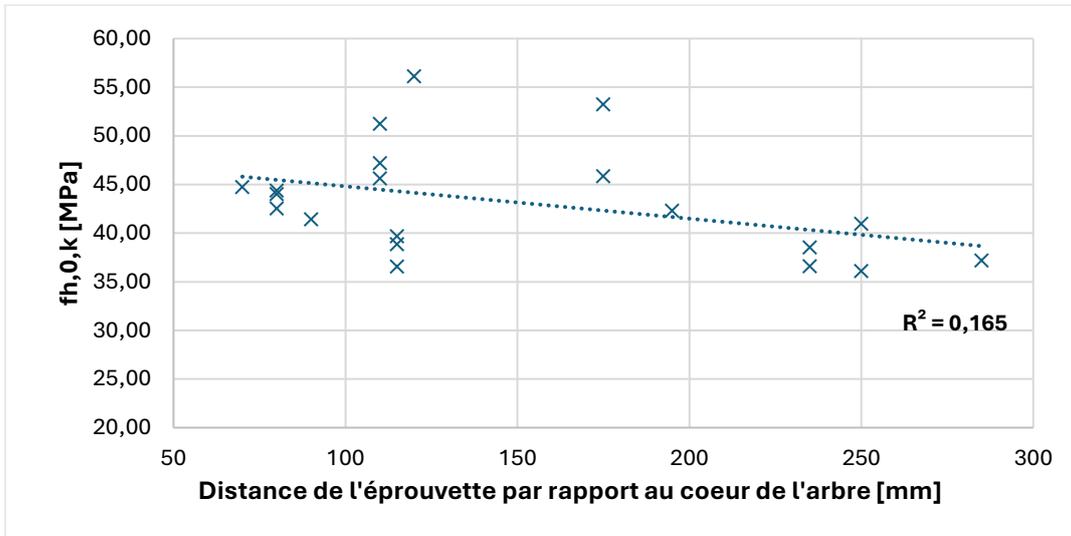
Essais de compression axiale :



Essais de compression transversale :

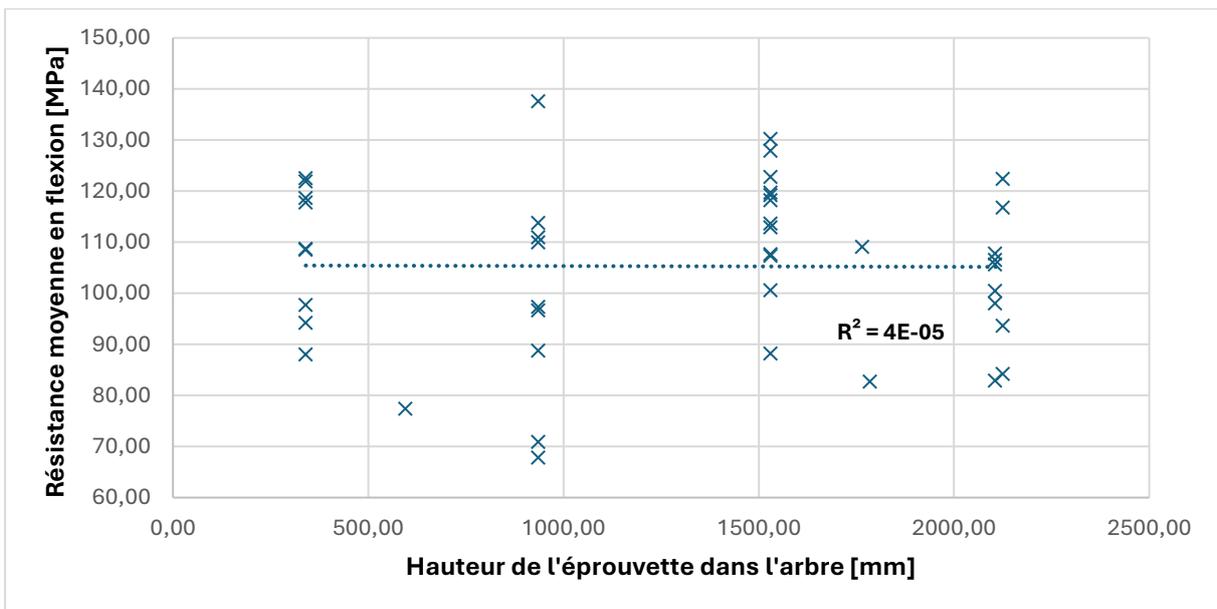
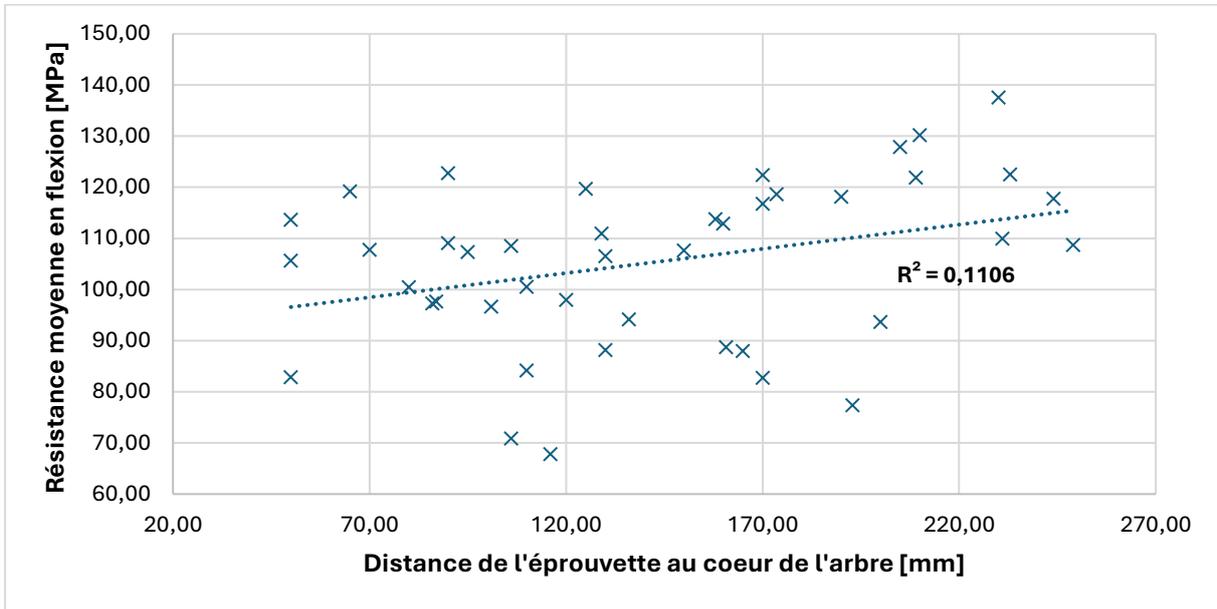


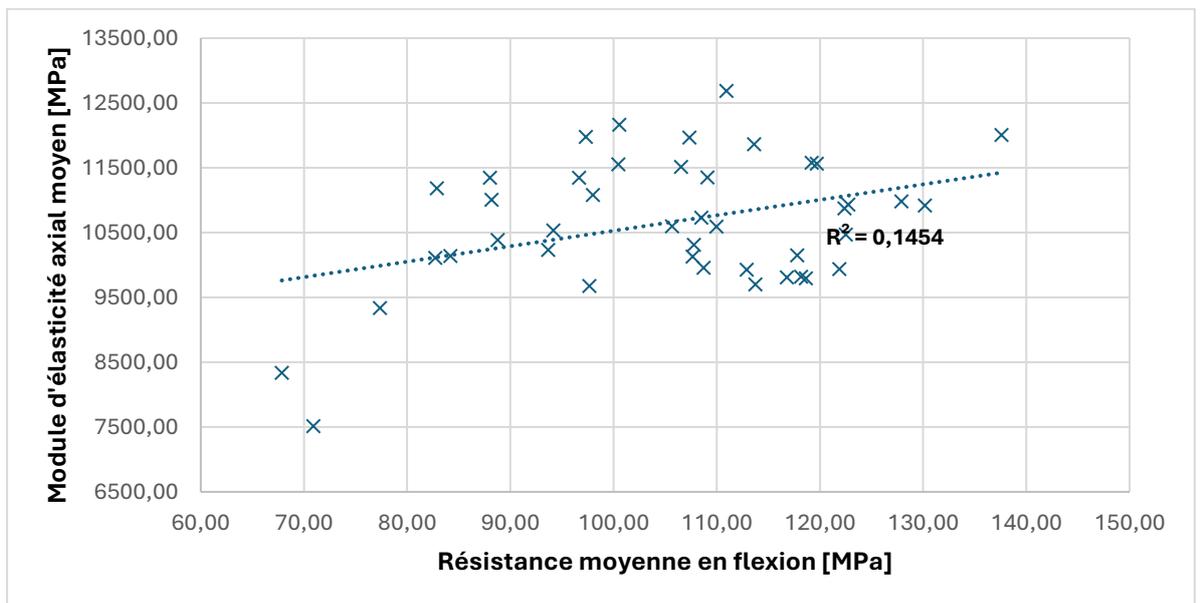
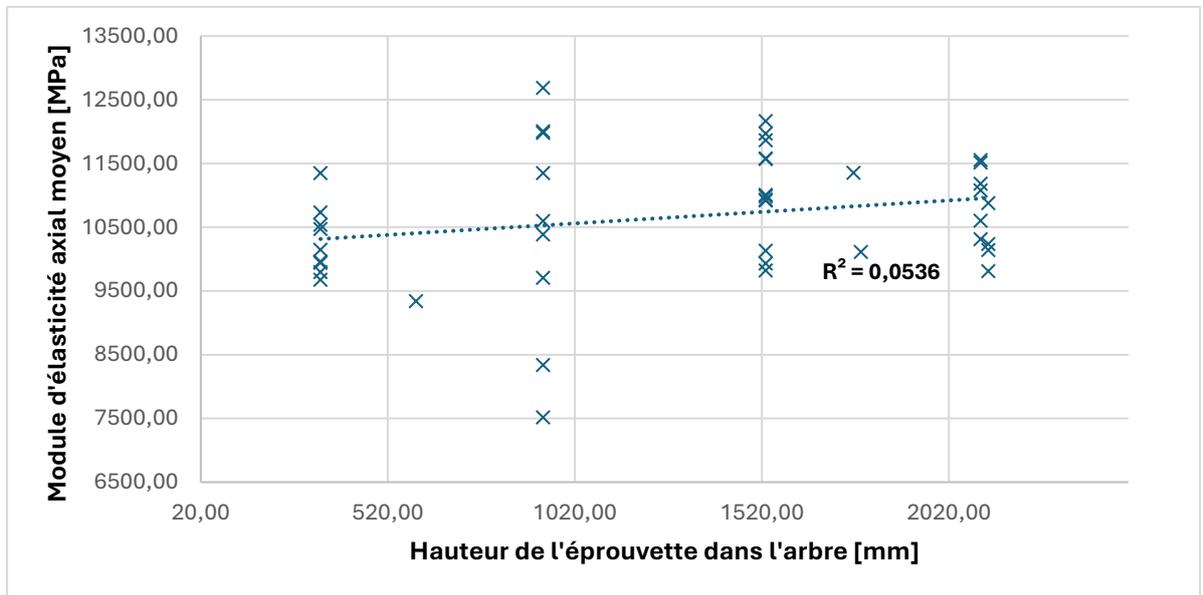
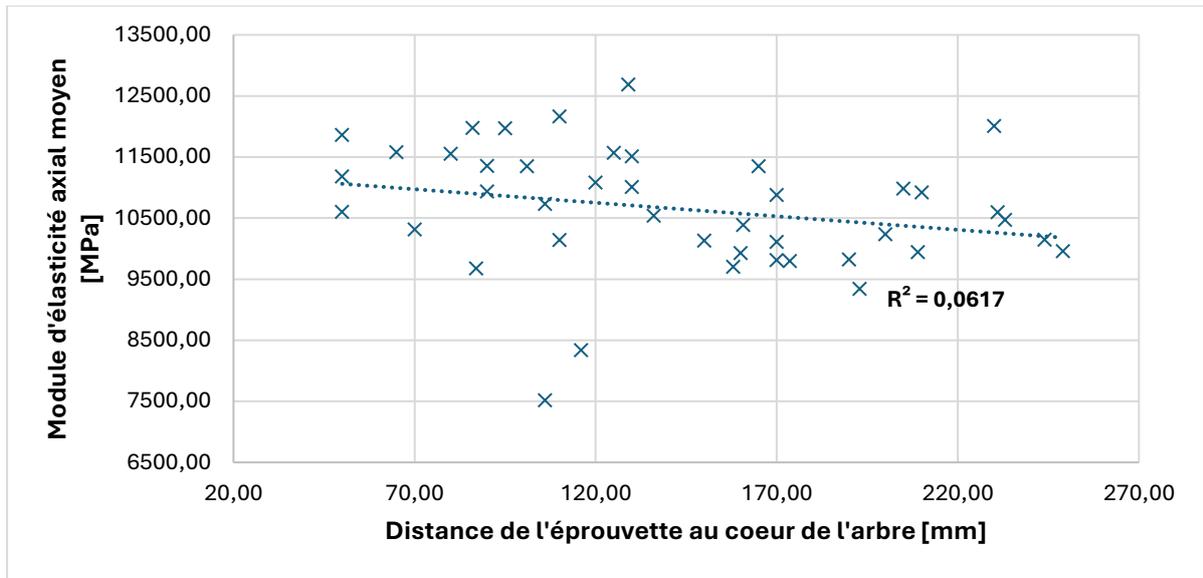
Essais de portance locale :



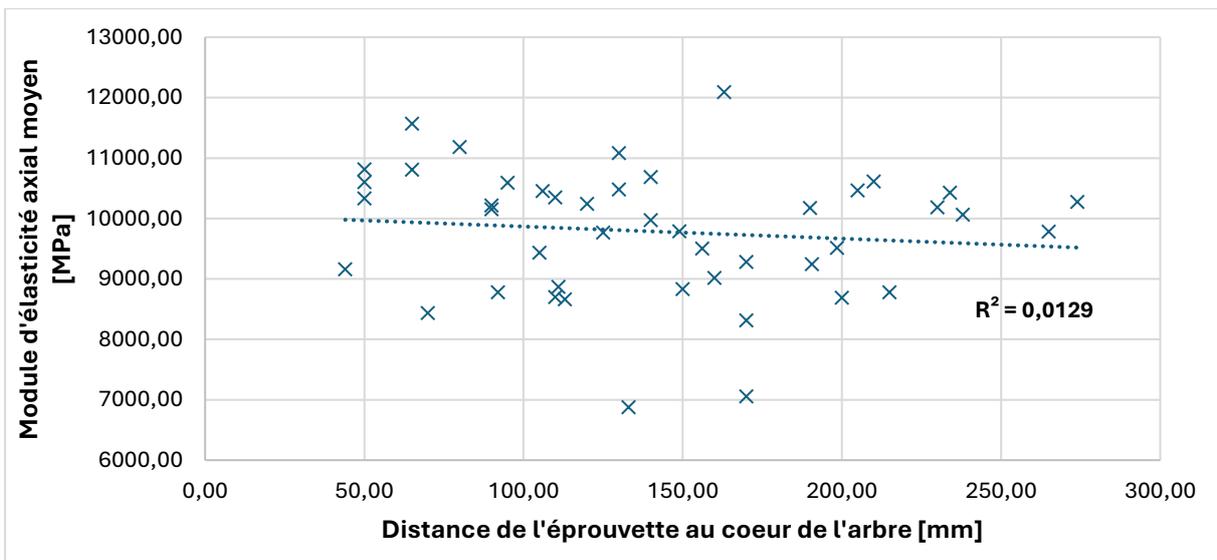
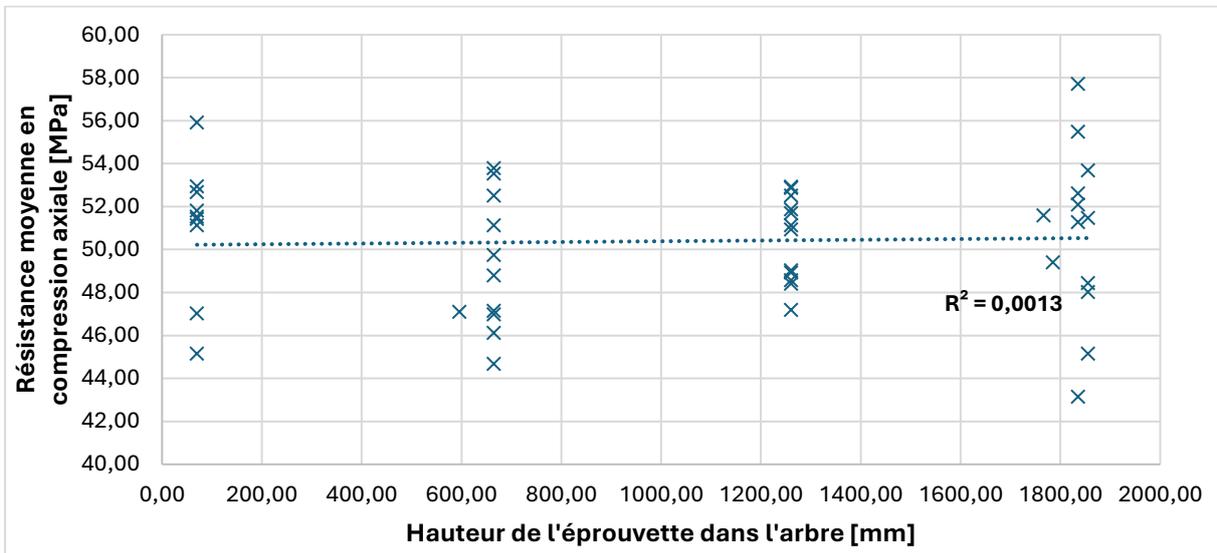
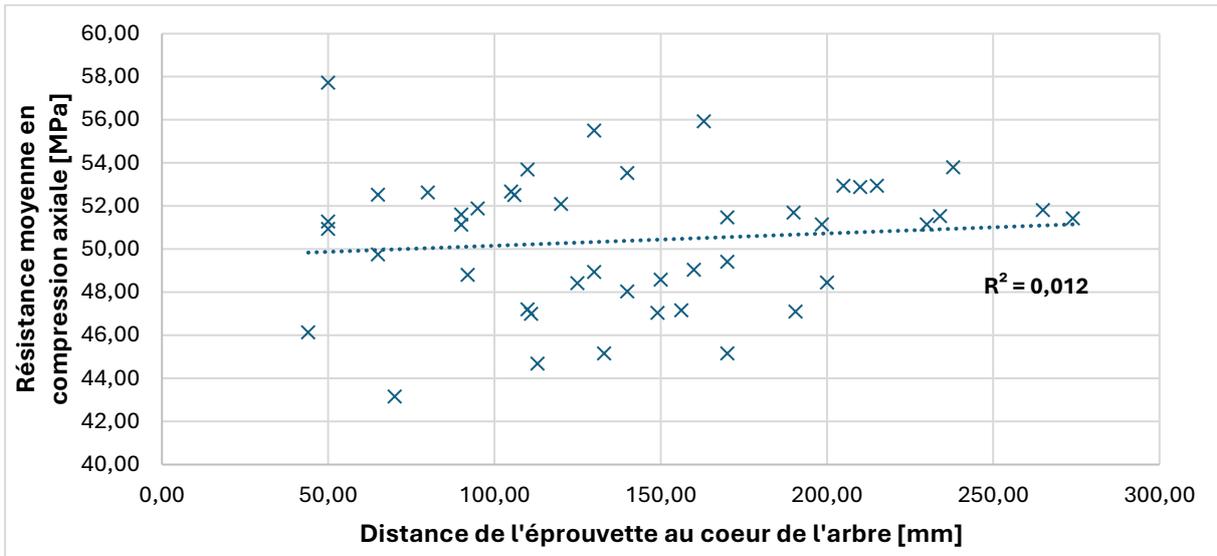
MAHOT BLEU

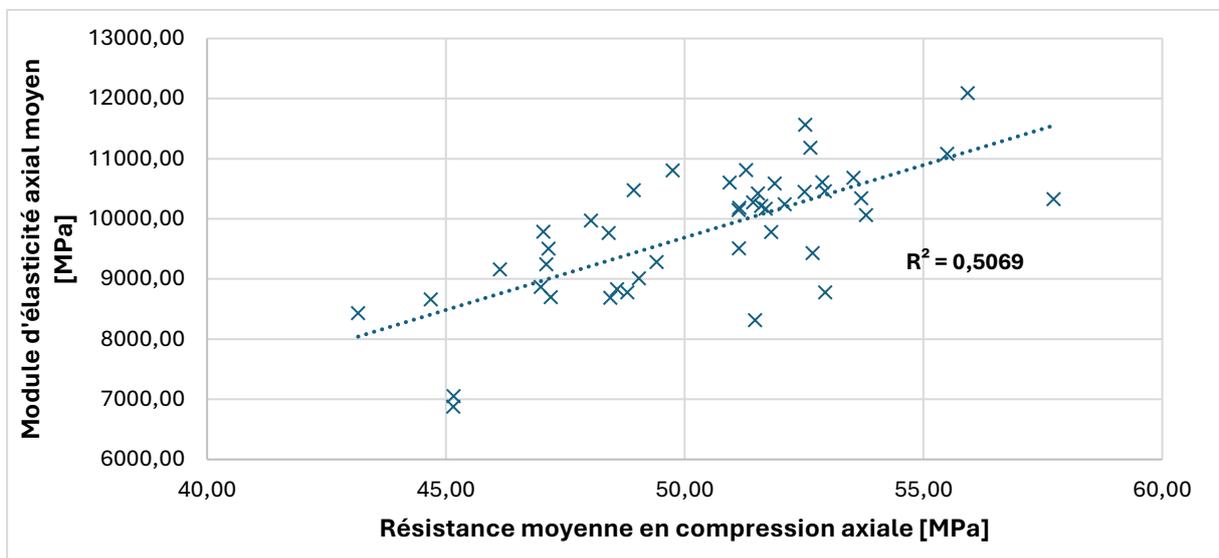
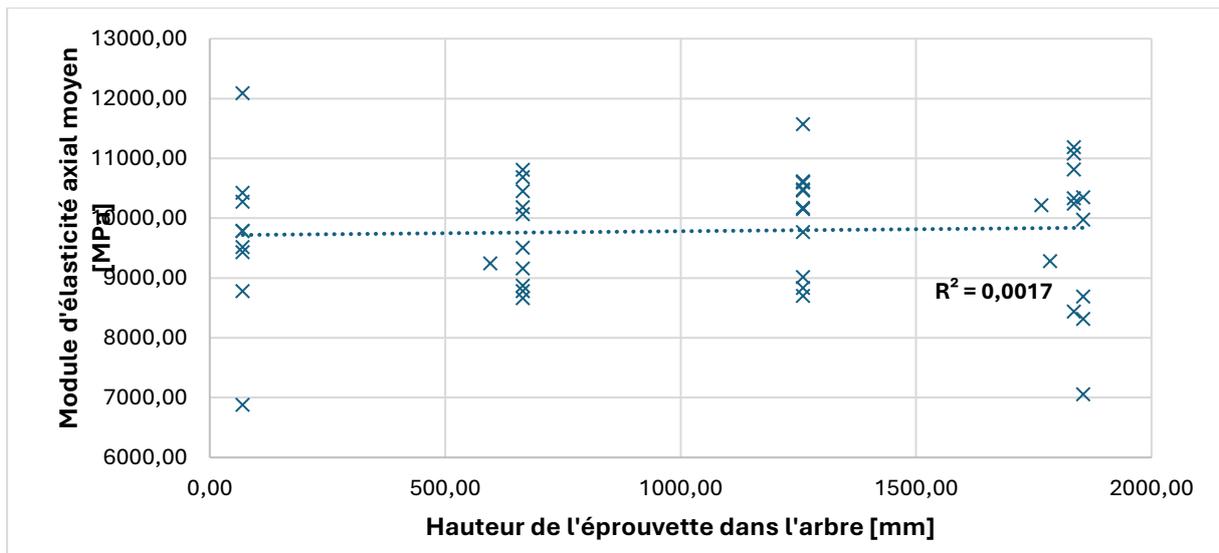
Essais de flexion :



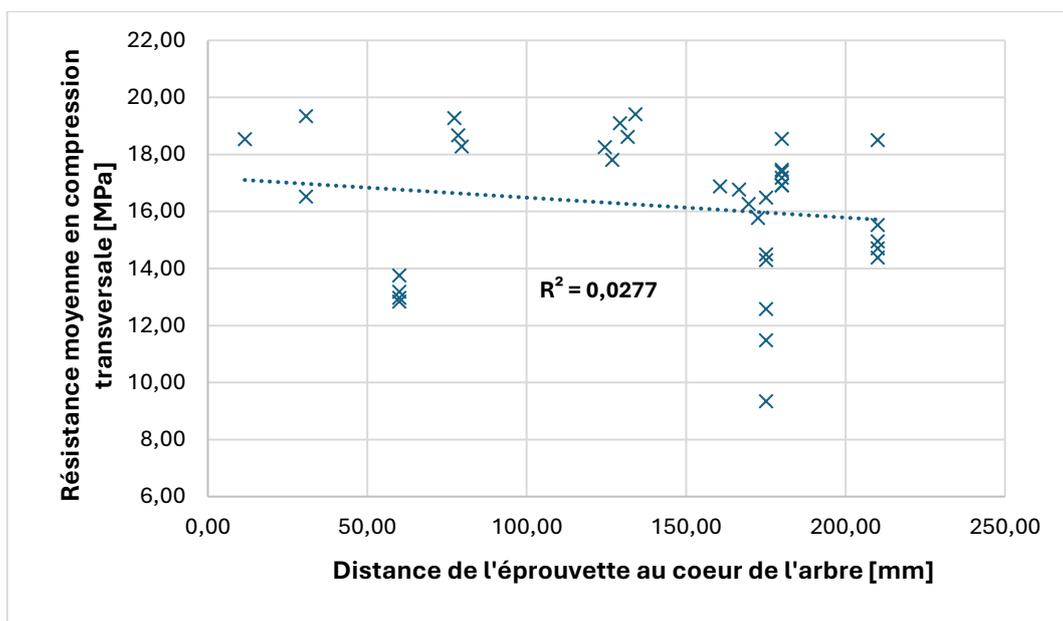


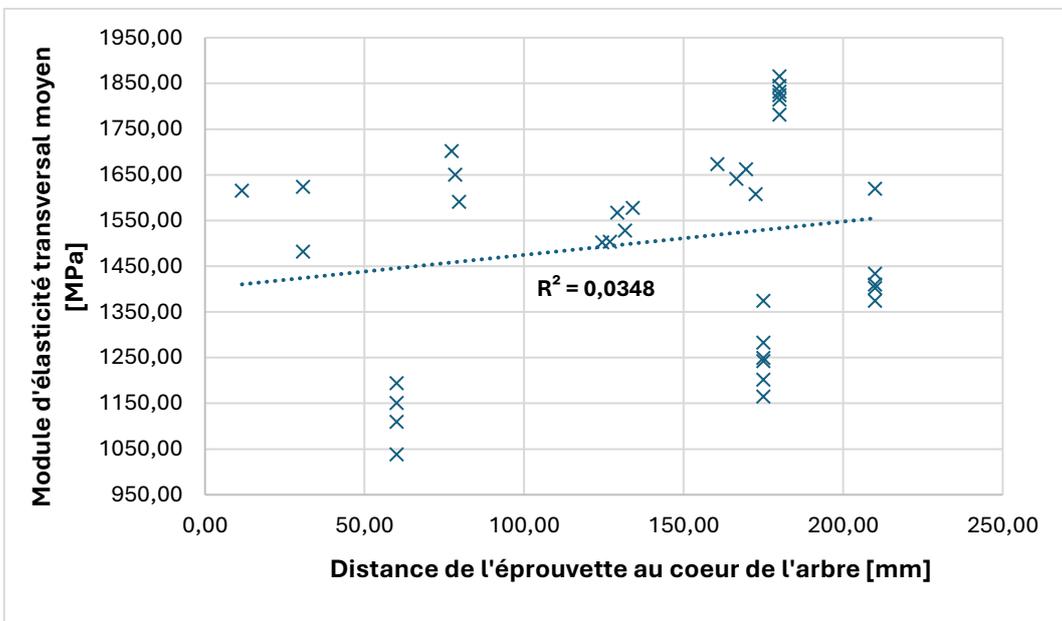
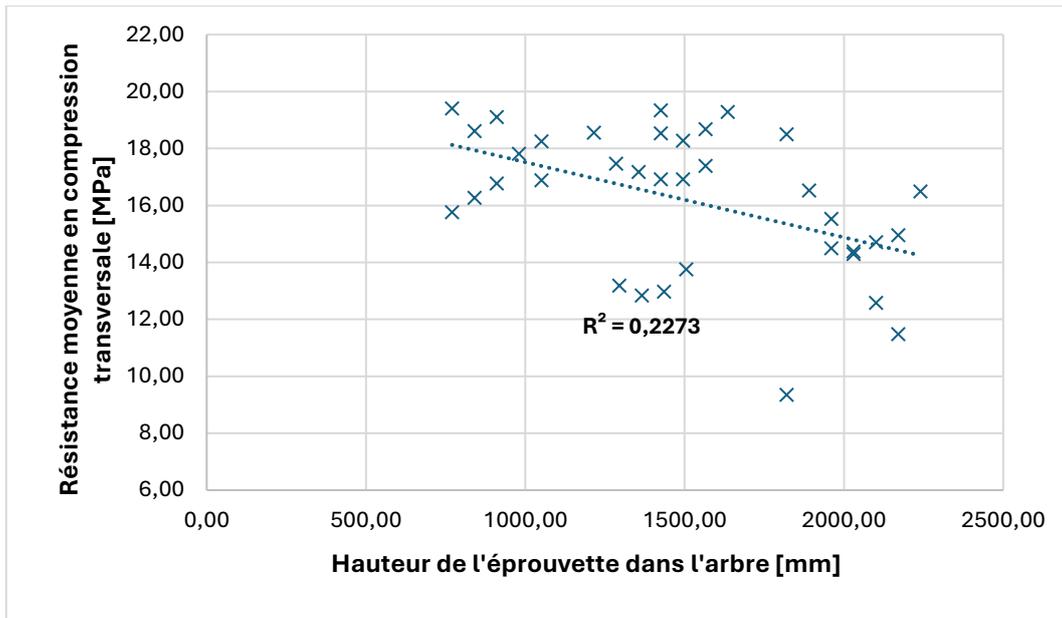
Essais de compression axiale :

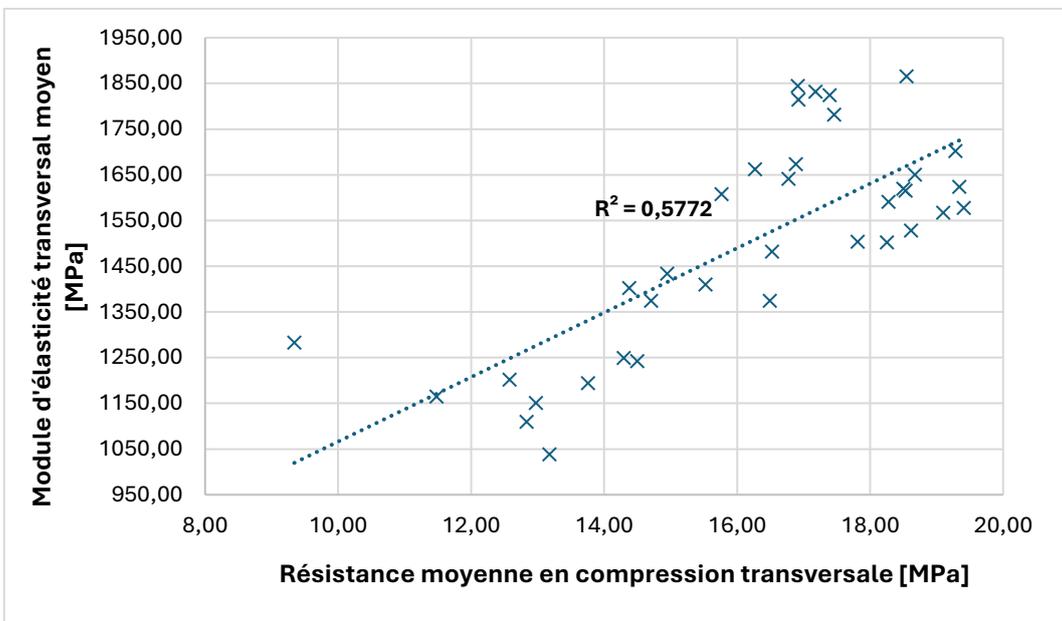
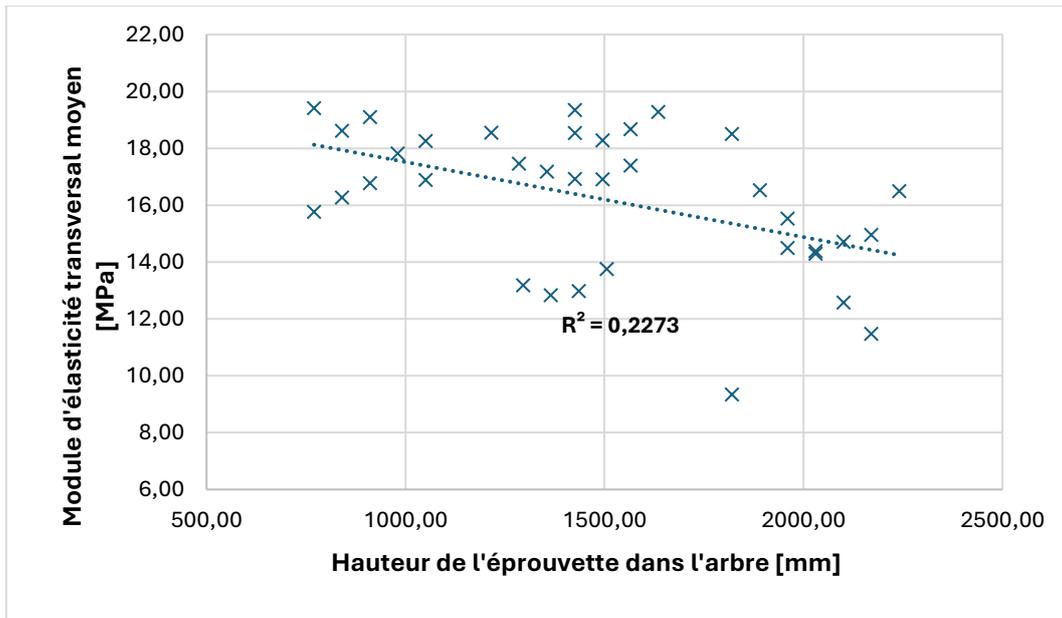




Essais de compression transversale :







Résumé

Ce projet porte sur la caractérisation physique et mécanique de bois de la Martinique. Les essences caractérisées sont le Mahogany grandes feuilles (*Swietenia macrophylla*), le Bois rivière (*Chimarrhis cymosa*), le Gommier blanc (*Dacryodes excelsa*), le Mahot bleu (*Hibiscus elatus*) et le Poirier pays (*Tabebuia heterophylla*). La campagne d'essais a permis de caractériser les éléments en flexion, en compression axiale, en compression transversale, de définir leurs portances locales, leurs différents retraits ainsi que leur dureté.

Mots-clefs : Propriétés physiques, propriétés mécaniques, caractérisation physique, caractérisation mécanique, Bois exotiques, Mahogany grandes feuilles (*Swietenia macrophylla*), Bois rivière (*Chimarrhis cymosa*), Gommier blanc (*Dacryodes excelsa*), Mahot bleu (*Hibiscus elatus*), Poirier pays (*Tabebuia heterophylla*).

Abstract

This project focuses on the physical and mechanical characterization of woods from Martinique. The species characterized are the « Mahogany grandes feuilles » (*Swietenia macrophylla*), the « Bois rivière » (*Chimarrhis cymosa*), the « Gommier blanc » (*Dacryodes excelsa*), the « Mahot bleu » (*Hibiscus elatus*) and the « Poirier pays » (*Tabebuia heterophylla*). The test campaign made it possible to characterize the elements in bending, axial compression, transverse compression, to define their local load-bearing capacity, various shrinkages and hardness.

Key words: Physical properties, mechanical properties, physical characterization, mechanical characterization, exotic woods, « Mahogany grandes feuilles » (*Swietenia macrophylla*), « Bois rivière » (*Chimarrhis cymosa*), « Gommier blanc » (*Dacryodes excelsa*), « Mahot bleu » (*Hibiscus elatus*) and « Poirier pays » (*Tabebuia heterophylla*).