

Caractérisation expérimentale des propriétés physiques, mécaniques et thermiques du palmier rônier (*Borassus aethiopum mart*) en fonction de la teneur en eau et de la température

[Experimental characterization of the physical, mechanical and thermal properties of palm tree (*Borassus aethiopum mart*) dependent of moisture content and temperature]

Memtine Ndong Augustin¹, Danebe Kada Alain¹, Djoda Pagore Frederick², and Nsouandele Jean Luc³

¹Département du Génie Textile et Cuir, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de Maroua, Université de Maroua, Cameroon

²Département de Génie Civil et Architecture, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de Maroua, Université de Maroua, Cameroon

³Département des Energies Renouvelables, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de Maroua, Université de Maroua, Cameroon

Copyright © 2024 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: This work determines the physical (density, shrinkage and porosity), mechanical (compression, bending, stress and Elasticity modulus) and thermal (conductivity, diffusivity, effusivity) characteristics that allow the rational and optimal use of palm tree, which is one of the biomaterials used in traditional and semi-modern construction in northern Cameroon. These properties were determined experimentally at different temperatures using the weighing method, mechanical tests and thermal using the «MINCO 230Ω P» heating resistor inserted between two samples. The test results obtained are interesting and satisfactory. The heartwood density varies from 300 to 400 kg.m⁻³ and the sapwood from 750 to 1,000 kg.m⁻³. Porosity depending of moisture content is between 76 and 80% for the heartwood and from 38 to 52% for the sapwood. The volumetric shrinkage rate is from 5 to 14% for the heartwood and from 6 to 9% for the sapwood. The stress and the Young's modulus of *Borassus Aethiopum mart.* at 12% of moisture content are respectively evaluated at 74.789 ± 5.171 MPa and 3,434.548 ± 82.195 MPa. The longitudinal compression stress is 58.290±3.582 MPa and 29.210±1.775 MPa for transverse compression, the longitudinal compression Young's modulus is 1,386.470 ± 41.661 MPa and transverse compression is 209.418 ± 6.456 MPa. The thermal effusivity is 458.189 J/m²Ks^{1/2}, the volumetric heat capacity is 322,627.7 J/m³K and the thermal conductivity is 0.651 W/mK are the thermal characteristics obtained. The results of the tests obtained are important and advantageous for the using of palm tree in civil engineering and cabinet-making.

KEYWORDS: Palm tree, physical, mechanical, thermal characteristics, temperature.

RESUME: Ce travail détermine les caractéristiques physiques, mécaniques, et thermiques permettant l'utilisation rationnelle et optimale du rônier qui fait partir des bio-matériaux dans les constructions traditionnelles et semi-modernes du Cameroun septentrional. Ces propriétés sont déterminées expérimentalement à différentes températures en utilisant la méthode par pesée, les essais de flexion trois points et le dispositif de la résistance chauffante « MINCO 230Ω P » insérée entre deux échantillons. Les résultats obtenus sont intéressants et satisfaisants. La masse volumique qui varie de 300 à 400 kg.m⁻³ pour le duramen et de 750 à 1 000 kg.m⁻³ pour l'aubier. La porosité en fonction de la teneur en eau est entre 76 et 80 % pour le duramen et de 38 à 52 % pour l'aubier. Le taux de rétractabilité volumique est de 5 à 14 % pour le duramen et de 6 à 9 % pour l'aubier. La contrainte à la rupture et le module d'Young du rônier à 12% sont respectivement évalués à 74,789 ± 5,171 Mpa, et à 3 434,548 ± 82,195 MPa. Les essais de compression déterminent la contrainte à la rupture longitudinale à 58,290±3,582 MPa et transversale à 29,210±1,775 MPa, le module d'Young en compression longitudinale est de 1 386,470 ± 41,661 MPa et transversale est de 209,418 ± 6,456 MPa. L'effusivité thermique de 458,189 J/m²Ks^{1/2}, la capacité thermique volumique de 322 627,7 J/m³K et la conductivité thermique de 0,651 W/mK. Ces résultats sont importants et avantageux pour les applications du rônier dans les ouvrages du génie civil et d'ébénisterie.

MOTS-CLEFS: Palmier rônier, caractéristiques physiques, mécaniques, thermiques, température.

1 INTRODUCTION

Le bois de rônier est un matériau composite naturel, extrait du palmier rônier (*Borassus aethiopum mart.*), de la famille des *arecacées* et natif des régions tropicales d'Afrique sahélienne et sub-saharienne, d'Asie et de Nouvelle-Guinée. Au Cameroun, il se rencontre principalement dans les régions septentrionales et l'Est [1-2]. Toutes ses parties sont exploités diversement comme dans la construction des habitats traditionnels et semi-modernes d'une part et comme combustible d'autre part en passant par l'ébénisterie [3-4]. Des recherches ont été menées sur la typologie des usages du rônier mais la connaissance sur leurs utilisations comme bois d'œuvre reste une préoccupation du fait de la méconnaissance des caractéristiques physique et mécanique en fonction de la teneur en eau et de la température. Ce manque d'information précise entraine également un souci majeur des sous-estimations technologiques et structurales de cet arbre [5-8].

Plus encore, le palmier rônier étant un biomatériau dépend de sa structure anatomique et de sa teneur en eau [9]. Les propriétés physico-mécaniques et thermiques du bois de rônier (*Borassus aethiopum mart.*) ne peuvent pas s'énoncer aussi rigoureusement que celles d'autres matériaux. Elles sont fonction de la variation des proportions en éléments chimiques qui le constitue à savoir la cellulose, l'hémicelluloses, l'air, l'eau et la lignine [10].

L'intérêt de cette étude permettant de justifier l'utilisation rationnelle et optimale du rônier, porte d'abord sur les évaluations de la masse volumique, de la rétractabilité volumique et de la porosité en fonction de la teneur en eau et de la température. Ensuite sur la contrainte à la rupture et le module d'élasticité en flexion et en compression longitudinale et transversale aux fibres sont menés. Enfin, sur les propriétés thermiques, l'effusivité thermique, la capacité thermique volumique et la conductivité thermique sont établies.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 MATÉRIEL

2.1.1 MATÉRIEL VÉGÉTAL

Le matériel végétal a été prélevé sur un tronc de rônier femelle, âgé d'environ 70 ans, abattu dans le village "Kongola", dans la région de l'Extrême Nord Cameroun. C'est un arbre de hauteur et de diamètre d'environ 15 m et 75 cm respectivement (figure 1a).

Des disques ont été prélevés à chaque mètre sur une hauteur utile de dix (10) mètre du sol (figure 1b). Des planches brutes de 25 mm d'épaisseur ont été sciées radialement dans les quatre directions du rayon, sur toute la surface du disque. Des éprouvettes ont été découpées de ces planches brutes aux dimensions de $20 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$ sur l'aubier et sur le duramen dans le sens longitudinal, tangentiel et radial (figure 1c) selon la norme ASTM D143-94 [11]. Toutes les éprouvettes ont été prélevées à l'état frais du palmier rônier.



a- Tronc de palmier rônier



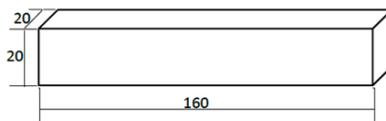
b- Disque de 30 cm de long extrait du tronc



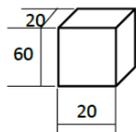
c- éprouvettes de $20 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$

Fig. 1. Matériel végétal

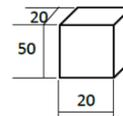
Des séries des échantillons ont été prélevés sur l'aubier et le duramen du rônier pour chaque type de sollicitation. Ces échantillons de forme parallélépipédique sont taillés suivant les normes NF B51-016 [12] pour les déterminations des propriétés physiques, mécaniques et thermiques du palmier rônier en fonction de la teneur en eau et de la température (figure 2) [13]. Quatre éprouvettes ont été prélevés sur l'aubier du rônier pour les essais thermiques avec pour dimensions: $100 \times 100 \times 20 \text{ mm}^3$.



a- Epreuve de flexion trois ponts



b- Epreuve de compression simple longitudinale



c- Epreuve de compression simple transversale

Fig. 2. Epreuves des essais mécaniques

2.1.2 MATÉRIEL TECHNIQUE

Une étuve de marque MEMMERT dont la température varie de 30 à 220 °C a été utilisé pour le séchage des éprouvettes. Un pied à coulisse numérique à 0,01 mm près a été mis à contribution pour la mesure des dimensions des éprouvettes et une balance électronique de marque SATORIUS de type PJ-400 de 0,001g a servi à faire les pesées pendant le séchage des éprouvettes (figure 3).



a- Pied à coulisse numérique



b- Balance de précision



Etuve de séchage

Fig. 3. Equipements utilisées pour la mesure des grandeurs physiques

Une presse hydraulique de marque COYON CJ-0820 (figure 4) avec acquisition des données a été utilisée pour la caractérisation mécanique des éprouvettes de palmier rônier.



a- Dispositif d'essai de flexion trois points

Capteur de mesure

Epreuve

Presse hydraulique



b- Dispositif d'essai de compression

Fig. 4. Dispositif de caractérisation mécanique

Le dispositif expérimental du type plan chaud asymétrique de la figure 5 a été utilisé pour les essais thermiques.

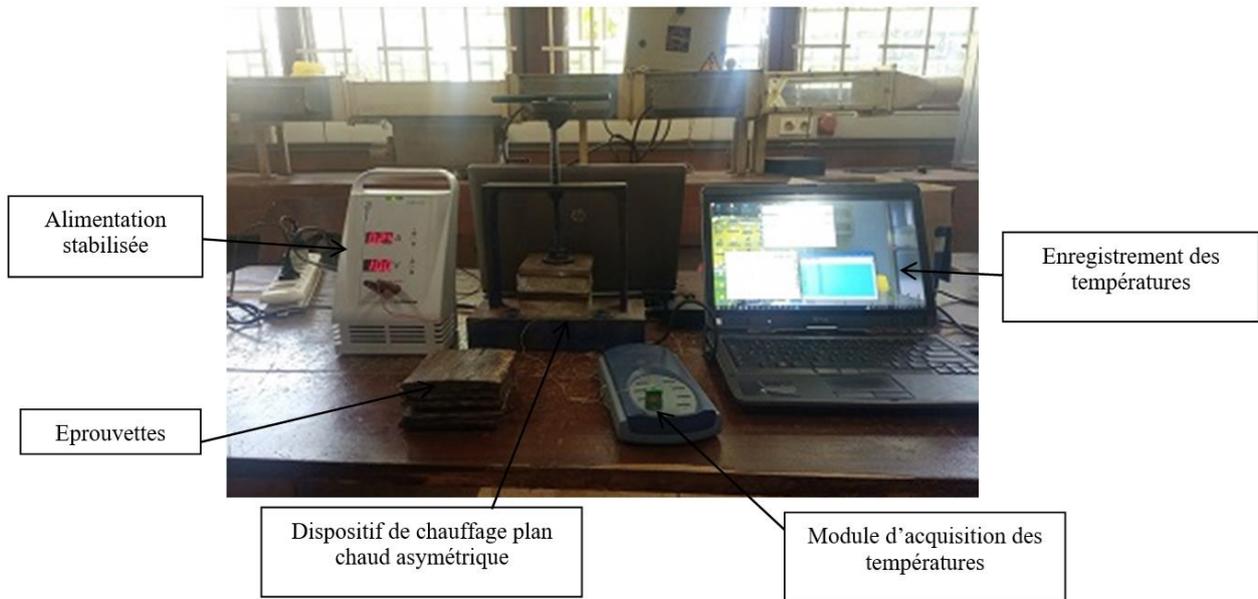


Fig. 5. Dispositif expérimental d'essai thermique

2.2 PROCOLES EXPÉRIMENTAUX

2.2.1 CARACTÉRISATION PHYSIQUE

La méthode par pesée est utilisée pour la détermination de la masse volumique, de la rétractabilité et de la porosité du rônier.

LA MASSE VOLUMIQUE

Cinq échantillons distincts prélevés sur l'aubier et cinq autres sur le duramen encore frais ont été d'abord séchés à 40°C, 50°C, 60°C et 70°C respectivement pour l'étude de la masse volumique. Ces échantillons ont été pesés et les dimensions mesurées toutes les heures à la sortie de l'étuve jusqu'à 12 % de leur teneur en eau. Enfin, ces derniers ont été séchés à l'étuve à 103 ± 2 °C jusqu'à stabilisation de leur masse.

Les différentes données lors de ces essais pratiques ont permis de déterminer les propriétés physiques du palmier rônier à l'aide des équations (1), (2), (3), (4) et (5):

La masse volumique anhydre ρ_0 de bois est donnée par la relation 1.

$$\rho_0 = \frac{M_0}{V_0} \quad (1)$$

Avec M_0 et V_0 respectivement la masse en kg et le volume du bois séché en m^3 .

La masse volumique considérée avec une teneur en eau H non négligé est:

$$\rho_H = \frac{M_H}{V_H} \quad (2)$$

Avec M_H et V_H la masse en kg et le volume en m^3 d'un échantillon à un taux d'humidité H.

La teneur en eau de l'échantillon est donnée par la relation 3:

$$H (\%) = \frac{M_H - M_0}{M_0} \times 100 \quad (3)$$

Avec M_H la masse de l'échantillon à la teneur en eau H , M_0 la masse de l'échantillon anhydre.

LA RÉTRACTIBILITÉ

La rétractibilité volumique est déterminée par la relation 4 toujours par la méthode par pesée.

$$B = \frac{V_H - V_0}{V_0} \times 100 \quad (4)$$

Avec V_H le volume de l'éprouvette à la teneur en eau H et V_0 le volume de l'éprouvette anhydre tous en m^3 .

LA POROSITÉ

La porosité p (%) est donnée par:

$$P = 100 \left(1 - \frac{\rho_0}{\gamma_s} \right) \quad (5)$$

Où ρ_0 (Kg/m^3) et γ_s (Kg/m^3) sont respectivement les masses volumiques de l'échantillon anhydre d'un bois supposé non poreux et une constante pour toutes les espèces de bois égale à 1500 kg/m^3 .

Les équations 2, 3 et 4, permettent d'obtenir l'équation (6):

$$\rho_H = \rho_0 \frac{(H + 100)}{(B + 100)} \quad (6)$$

2.2.2 CARACTÉRISATION MÉCANIQUE

Dix (10) échantillons ont été prélevés sur l'aubier et le duramen du rônier pour chaque type de sollicitation. Ces échantillons de forme parallélépipédique sont taillés suivant les normes NF B51-016 [12] pour les essais de flexion trois points, NF ISO 13061-17 [13] et ISO-13061-5-2020 [14] pour les essais de compression simple (figure 4). Une charge de 5 kN et de 100 kN a été respectivement appliquée aux échantillons de rônier de teneur en eau de 12%, à la vitesse 2 mm/min jusqu'à la rupture pour, respectivement les essais de flexion trois points et de compression simple longitudinale et transversale aux sens des fibres. Le logiciel Test Master a été utilisé pour tracer les courbes Force-Déplacement et effectuer le calcul de tous les paramètres de l'essai.

Les essais de flexion trois points permettent de déterminer la résistance mécanique en flexion par la relation 7, la déformation maximale de l'éprouvette par la relation 8 et le module d'élasticité en flexion par la relation 9.

$$\sigma_f = \frac{3F_m L}{2bh^2} \quad (7)$$

$$\varepsilon_f = \frac{6h}{L^2} \times s \times 100 \quad (8)$$

$$E = \frac{F_m L^3}{4bsh^3} \quad (9)$$

F_m (N) est la force maximale en flexion de l'éprouvette;

b (mm) et h (mm) sont respectivement la largeur et l'épaisseur de l'éprouvette;

s (mm) est la flèche;

L (mm) est la longueur entre appui de l'éprouvette (160 mm);

ε_e (%) est la déformation élastique de l'éprouvette.

Les essais de compression permettent de déterminer la résistance mécanique en compression par la relation 10, la déformation maximale de l'éprouvette par la relation 11 et le module d'élasticité en compression par la relation 12.

$$\sigma_c = \frac{F_m}{S} \quad (10)$$

$$\varepsilon_f = \frac{A_r}{L} \times 100 \quad (11)$$

$$E = \frac{\sigma_e}{\varepsilon_e} \times 100 \quad (12)$$

F_m (N) est la force maximale en compression de l'éprouvette;

S (mm²) la section de l'éprouvette;

A_r (mm) Rétrécissement à la rupture;

L (mm) est la longueur de l'éprouvette;

ε_e (%) est la déformation élastique de l'éprouvette;

σ_e (MPa) la limite d'élasticité $\sigma_e = \frac{F_e}{S}$.

2.2.3 CARACTÉRISATION THERMIQUE

Quatre échantillons ont été séchés dans une étuve à 105 °C pendant 48 h. Ensuite, ils sont placés dans des plastiques et conservés pendant 48 h pour avoir une température uniforme pour tous les échantillons au cours de l'expérience. A partir de la relation mathématique (1), la masse volumique anhydre est obtenue. La température ambiante et l'humidité relative lors des mesures de conductivité thermique sont respectivement de 22 °C et 60 % HR [15 - 17].

Le dispositif de la figure 5 utilise une résistance chauffante « MINCO 230Ω P » insérée entre deux échantillons de surface plane du palmier rônier à caractériser de telle sorte que la chaleur est appliquée perpendiculairement aux sens des fibres. L'élément chauffant est relié à un thermocouple de type k qui, est relié à un système d'acquisition des données. Cet ensemble est inséré entre deux blocs de polystyrène d'une épaisseur de 5 cm et le tout est maintenu par deux blocs d'aluminium d'épaisseur de 4 cm chacun.

La capacité thermique massique ou chaleur spécifique en J/Kg.K est donnée par la relation 13.

$$C_p = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dt} \quad (13)$$

La conductivité thermique λ en W/m.K est donnée par la relation 14.

$$\lambda = \frac{E^2}{\rho C_p} \text{ ou } \lambda_{est} = \frac{(E^2)_{est}}{(\rho C_p)_{est}} \quad (14)$$

La diffusivité thermique a en m²/s est donnée par la relation 15.

$$a = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (15)$$

3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES

3.1.1 LA TENEUR EN EAU ET MASSE VOLUMIQUE EN FONCTION DU TEMPS

La caractérisation physique du palmier rônier du type *Borassus aethiopum mart* a permis d'obtenir l'évolution de la teneur en eau et de la masse volumique en fonction du temps d'une part (Figures 6 et 7), la masse volumique, la rétractabilité et de la porosité en fonction de la teneur en eau d'autre part (figures 8 à 11).

On remarque que la teneur en eau décroît avec l'augmentation de la température de séchage. Celle-ci décroît avec le temps de séchage. La teneur en eau initiale du duramen est d'environ cinq fois supérieure celle de l'aubier. Mais, ce séchage est moins rapide à 40 °C et 50 °C qu'au séchage à 60 °C et 70 °C dans le temps (figure 6). Ceci prouve dans le rônier la forte présence en eau liée et libre d'une part et l'abondance de la matière ligneuse et la présence des faibles interstices dans l'aubier contrairement au duramen à fortes interstices d'autre part. De ce fait, le séchage à 60 °C et à 70 °C, permet une évaporation de l'eau liée alors qu'à 40 °C et 50 °C, l'eau libre est extraite. Ce qui confirme l'originalité de la plante qui est originaire des zones tropicales d'Afrique sahélienne et sub-saharienne, d'Asie. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Nsouandele et al., (2016) [18] et Ekomy et al., (2015) sur les bois tropicaux [19] et Ngargueudedjim et al., (2019) [20] sur le rônier.

A partir des valeurs de la masse volumique (figure 7), seule l'aubier est exploitable dans les constructions des ouvrages de génie civil, avec une teneur en eau initiale d'environ 65 % qui peut être stabilisée à 12 %. Avec une teneur en eau initiale d'environ 280 %, le duramen (moelle) est exploité dans l'agroalimentaire pour la production du vin de palme conformément aux résultats de Behi et al., 2002 [21].

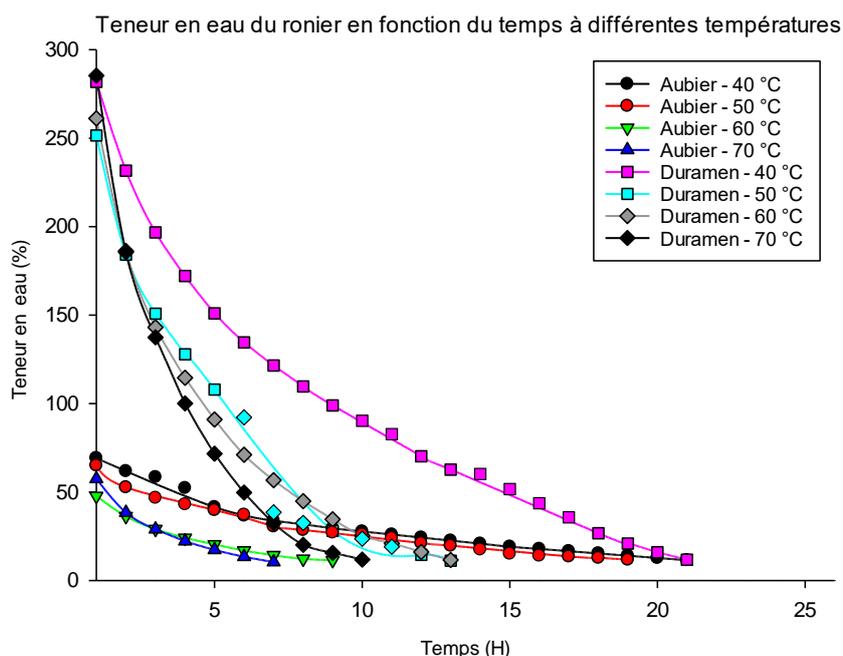


Fig. 6. Teneur en eau de l'aubier et du duramen du rônier en fonction du temps à différentes températures de séchage

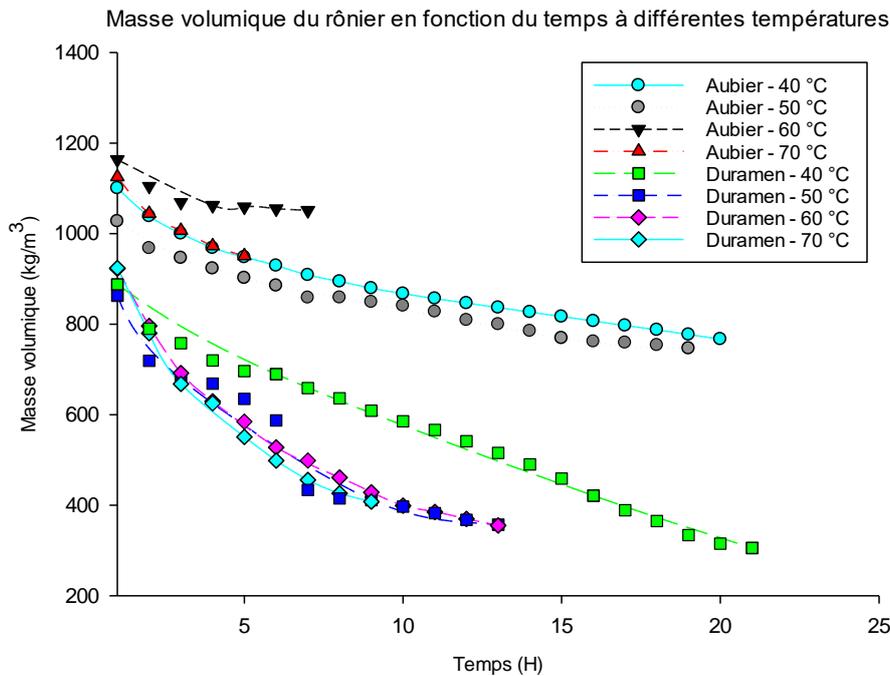


Fig. 7. Masse volumique de l'aubier et du duramen du rônier en fonction du temps à différentes températures de séchage

Initialement, la masse volumique de l'aubier est comprise entre 1000 et 1200 kg.m⁻³ et celle du duramen varie de 850 à 950 kg.m⁻³. Après séchage, ces valeurs varient de 750 à 1000 kg.m⁻³ pour l'aubier et de 300 à 400 kg.m⁻³ pour le duramen (figure 7). La variation de la masse volumique dans le temps aux températures de séchage à 40 °C et à 50 °C est beaucoup plus étendue parce que ces températures permettent une évaporation de l'eau libre alors que la variation de la masse volumique dans le temps aux températures de séchage à 60 °C et à 70 °C est plus courte parce que ces températures permettent une évaporation plus rapide de l'eau libre; de ce fait favorisent la présence de l'eau liée. Ces variations de la masse volumique ont la même allure aux résultats des bois tropicaux obtenus par Nsouandele et al., (2016) [18].

3.1.2 LA MASSE VOLUMIQUE, LA RÉTRACTABILITÉ ET LA POROSITÉ EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU

Au début, la teneur en eau de l'aubier est comprise entre 35 et 65 % et celle du duramen varie de 200 à 300 %. Le séchage à chaque température met en exergue les deux parties essentielles du palmier rônier (figure 8). Alors l'aubier est un bois mi-lourd et lourd avec une masse volumique comprise entre 750 et 1 000 kg.m⁻³. Cette partie à une texture forte et plus complexe, prédisposée dans l'utilisation des composites et des stratifiés.

Le duramen est un bois léger. Sa masse volumique qui varie de 300 à 400 kg.m⁻³ exploitable dans les composites à renforts poudreux. Ces résultats sont similaires à ceux de Ngargueudedjim et al., (2015) [7] et Komlan et al., (2019) [22].

La variation de la masse volumique avec la teneur en eau du palmier rônier est plus importante au-dessus du point de saturation des fibres à cause de la migration d'eau libre, et faible en dessous à cause de la faible variation des masses par extraction d'eau liée. Car l'évaporation d'eau dans le rônier augmente avec la température.

Il ressort toujours de la figure 8 que la masse volumique du palmier rônier est plus influencée par la teneur en eau à différente température de séchage selon un schéma linéaire conformément à J. Gérard et al., (1998) [23], Nsouandele et al., (2016), et Tagne et al., (2009) [24] d'où la nécessité de la corrélation à établir par la relation mathématique 14 pour la prise en compte lors des simulations [18].

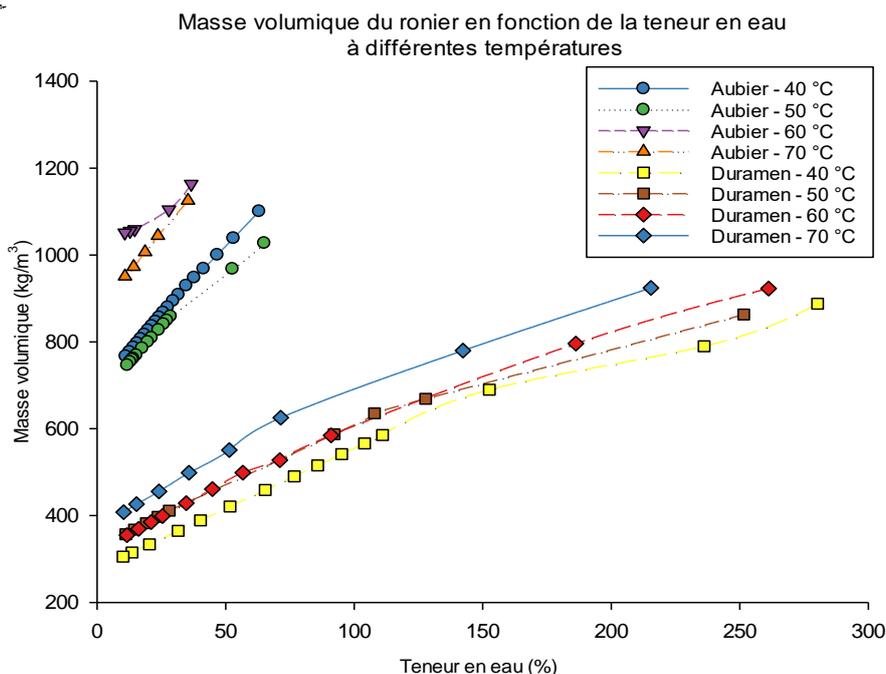


Fig. 8. Masse volumique de l'aubier et du duramen du rônier en fonction de la teneur en eau à différentes températures de séchage

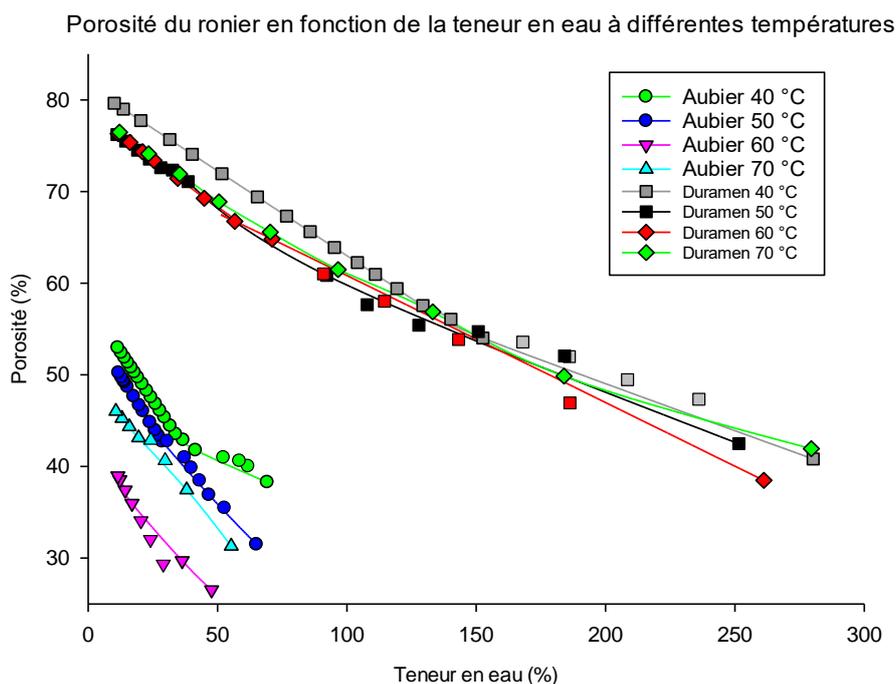


Fig. 9. Porosité de l'aubier et du duramen du rônier en fonction de la teneur en eau à différentes températures de séchage

On constate une augmentation approximativement linéaire de toutes les rétractibilités du palmier rônier (figure 10). La rétractabilité volumique de l'aubier varie de 6 et 9 %, valeurs proches de celles obtenues de Gbaguidi et al., (2011) (figure 10) [25], alors que celle du duramen varie de 5 à 14 %. Ces valeurs sont proches de celles de Ngarguededjim *et al.* (2015) [26] et de Acheampong *et al.*, (2022) [27]. La rétractabilité longitudinale maximale de l'aubier est de 1,6 % alors que celle du duramen est presque nulle (0,4 %). La rétractabilité tangentielle de l'aubier est de 5 % alors que celle du duramen est de 10 %. La rétractabilité radiale des deux parties du rônier oscille autour de 3 %. Le point de saturation des fibres (PSF) est à 22% de sa teneur en eau pour l'aubier et de 100 % de sa teneur en eau pour le duramen. Il ressort de la figure 10 que les teneurs en eau inférieures au point de saturation des fibres (PSF), puis un plateau au-delà, mettant en évidence la saturation des sites d'adsorption de pores. On conclut que l'aubier a un faible retrait volumique avec un PSF à

22% alors que le duramen a un moyen retrait volumique avec un PSF à 100% (figure 11). Ces résultats sont proches de ceux de J. Gérard et al., (2016) [28].

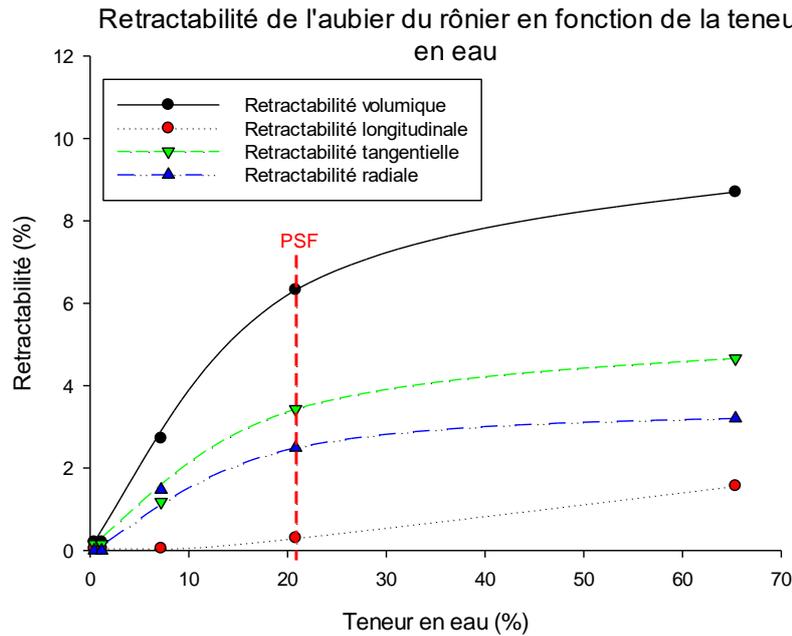


Fig. 10. Rétractabilité de l'aubier de rônier en fonction de la teneur en eau

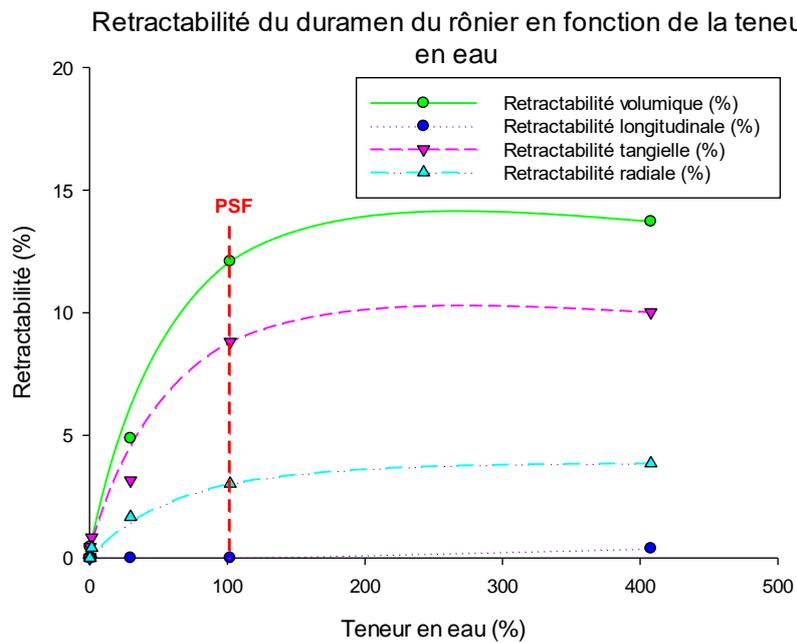


Fig. 11. Rétractabilité du duramen de rônier en fonction de la teneur en eau

Initialement, la porosité de l'aubier est comprise entre 26 et 38 %, alors que celle du duramen varie de 38 à 42 %. Après séchage, elle varie de 38 à 52 % pour l'aubier et de 76 à 80 % pour le duramen (figure 9). Les valeurs de la porosité montrent que, plus le rônier est dense, moins il est poreux, en outre, cette porosité augmente lorsque la teneur en eau diminue selon un schéma linéaire, d'où également la nécessité de l'étude d'une corrélation comme le montre B. Bonoma, M. S. Tagne, et L. Monkam (2010) [29].

Les figures 12 et 13 présentent la régression linéaire de la masse volumique et de la porosité du palmier rônier en fonction de la teneur en eau.

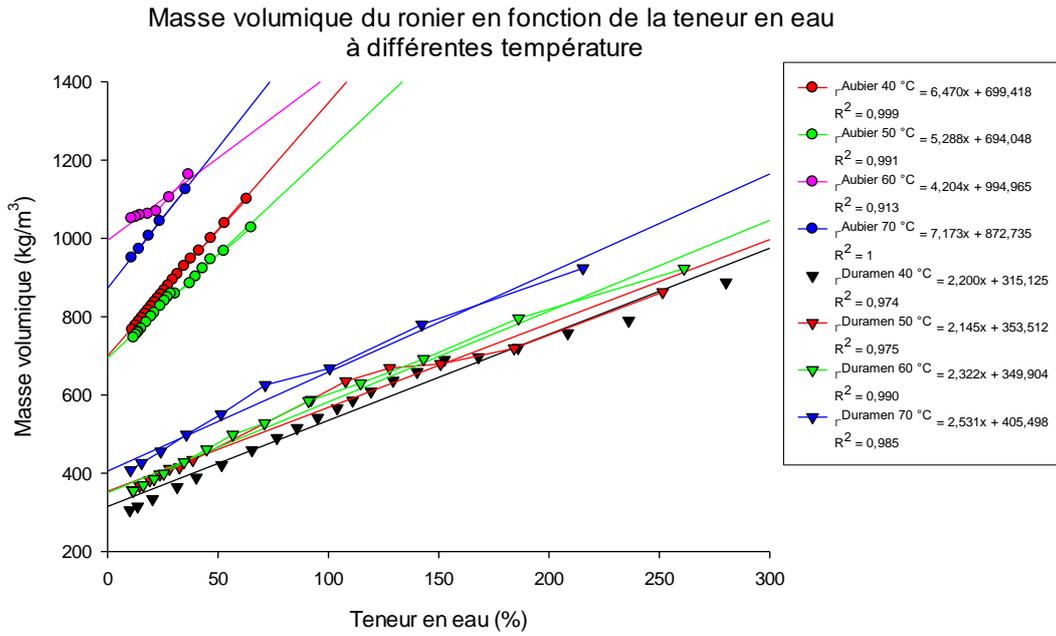


Fig. 12. Droites de régression de la masse volumique du rônier à différentes températures

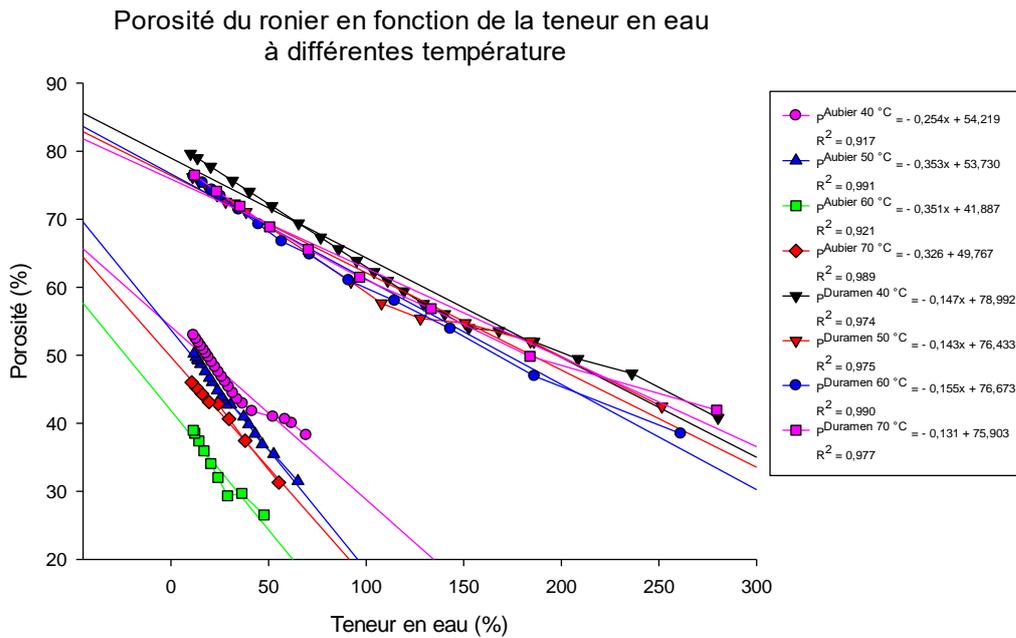


Fig. 13. Droites de régression de la porosité du rônier à différentes températures

3.1.3 CORRÉLATION DE LA MASSE VOLUMIQUE ET DE LA POROSITÉ EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU ET DE LA TEMPÉRATURE

Pour corrélérer les points expérimentaux, une relation prenant en compte à la fois l'influence de la température et de la teneur en eau est nécessaire. Soit:

$$\rho(T, H) = a + bT + cH + dHT \quad (14)$$

Où $\rho_H(T) = A + BH$ (15)

Avec $A = a + bT$ et $B = c + dT$ (16)

Avec T est la température (°C), H est la teneur en eau (%).

Les coefficients a, b, c et d sont à déterminer à partir de valeurs expérimentales. Celles-ci sont ainsi évaluées en minimisant l'écart entre les courbes expérimentales et les courbes théoriques. L'incertitude relative nécessaire entre les expériences et les corrélations correspondantes est déterminée par l'équation 17.

$$E(\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|\rho_{thi} - \rho_{exi}|}{\rho_{exi}} \tag{17}$$

Où ρ_{th} et ρ_{ex} sont des masses volumiques obtenues respectivement par corrélation et expérimentation et N est le nombre de points expérimentaux par partie du rônier.

Cette étude montre que la masse volumique anhydre est liée à la température et est donnée par la relation (18).

$$\rho_H(T, 0) = a + bH \tag{18}$$

où $\rho_0(T, 0) = A = \rho_0$

Les coefficients a, b, c, d résultant par partie étudiée en fonction de la température sont données dans le tableau 1 ci-dessous. Ces réels nécessitent une interprétation physique. Chaque coefficient est une valeur purement anhydre correspondant à la température de 0°C et à un taux d'humidité nul. Car il n'est pas possible d'obtenir expérimentalement cette valeur. Les coefficients b, c, d sont des approximations au premier ordre de la masse volumique fonction de la teneur en eau et de la température. Ils permettent de favoriser le coefficient a afin de retrouver des valeurs physiques réelles. Ces corrélations améliorent les modèles et les rapprochent des résultats pratiques.

L'influence de la température de séchage est évidente sur ces deux propriétés et les pentes diffèrent selon la partie étudiée (aubier, duramen).

L'influence de la température n'est pas explicite dans les pentes de régression diffèrent selon les parties du rônier, ce qui conduit à l'étude de la porosité du bois et à l'influence de la température dans la régression linéaire (figures 12 et 13).

Les masses volumiques anhydres et standards (tableau 1) obtenues correspondent aux résultats de J. Gérard et al., (1998) et fournissent d'avantage les informations sur les bois tropicaux.

Les résultats de la porosité du Tableau 1 montrent que la porosité diminue lorsque la densité du bois augmente. Les fibres des bois lourds sont emmêlées, irréguliers et souvent entrelacées. Ces bois lourds peuvent être utilisés en génie civil. Les bois légers sont utilisés en menuiserie intérieure/extérieure et en ébénisterie. Au vue des valeurs de la porosité obtenue, les deux parties du palmier étudié peuvent être utilisées comme renforts des matériaux composites.

Tableau 1. Valeur des masses volumiques du rônier en fonction de la teneur en eau et de la température

Partie	T (°C)	B (kg/m³)	A (kg/m³)	P (%)	ρ_0 (kg/m³)	ρ_{15} (kg/m³)	E (%)
Aubier	40	6,47	699,418	54,219	699,418	797,086	4,002
	50	5,288	694,048	53,73	694,048	769,484	3,286
	60	4,204	994,965	41,887	994,965	1059,457	0,548
	70	7,173	872,735	49,767	872,735	978,864	0,707
Duramen	40	2,2	315,125	78,992	315,125	319,127	7,976
	50	2,145	353,512	76,433	353,512	369,307	3,597
	60	2,322	349,904	76,673	349,904	366,06	3,864
	70	2,531	405,498	75,903	405,498	426,201	2,400

3.2 CARACTÉRISATION MÉCANIQUE

Les caractéristiques mécaniques sont calculées à partir des données acquises par les machines hydrauliques pendant les opérations de compression et de flexion trois points.

3.2.1 ESSAIS DE COMPRESSION

La figure 14 présente les courbes de compression de l’aubier du palmier rônier. Ces courbes des différents essais de compression donnent une allure identique à celle obtenue par Djoudi et al., 2018 représentée dans la figure 14a. Les courbes d’essai présentent des déformations du rônier en plusieurs points (figure 14b). Ces résultats sont intéressants et semblables à ceux obtenus par Ngargueudedjim et al., 2015.

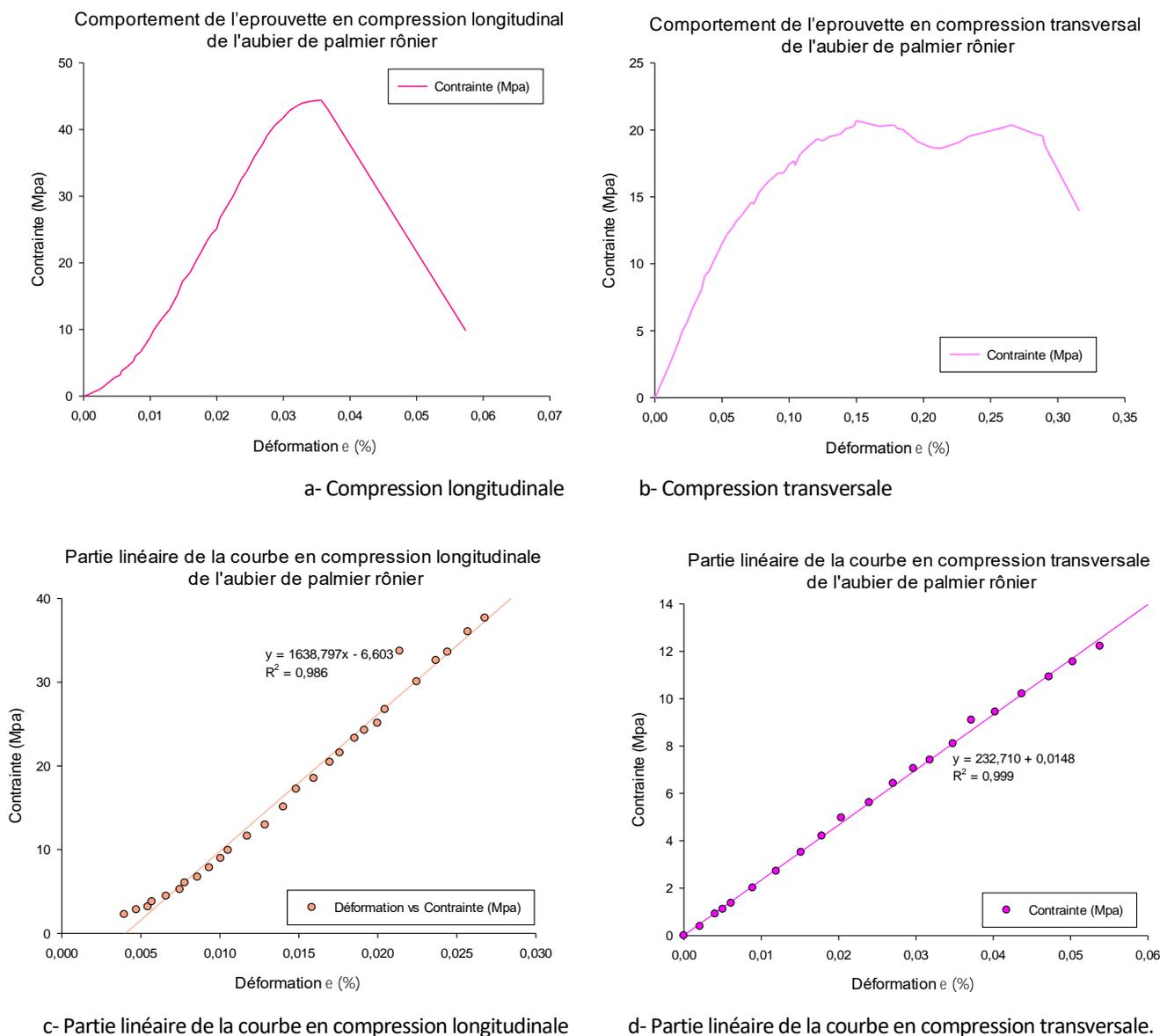


Fig. 14. Les courbes de compression de l’aubier du palmier rônier

Les courbes contrainte - déformation en compression ci-dessus montrent le caractère anisotrope du matériau testé. Dans le domaine élastique les éprouvettes conservent leur forme cubique pour les deux essais. Les moyennes des valeurs caractéristiques en compression dans les deux sens sont présentées dans le Tableau 2.

3.2.2 ESSAIS DE FLEXION TROIS POINTS

La figure 15 présente les courbes de flexion trois points de l’aubier du palmier rônier. Les résultats des essais de flexion trois points de l’aubier du palmier rônier sont représentés sur les courbes de force-élongation de la figure 15. Ces courbes montrent deux phases d’évolution de la courbure en fonction de la contrainte. Une phase de croissance linéaire et une phase de déformation plastique où les

efforts décroissant se décomposent. Le Tableau 2 présente les moyennes des valeurs caractéristiques en flexion trois points de l’aubier du palmier rônier.

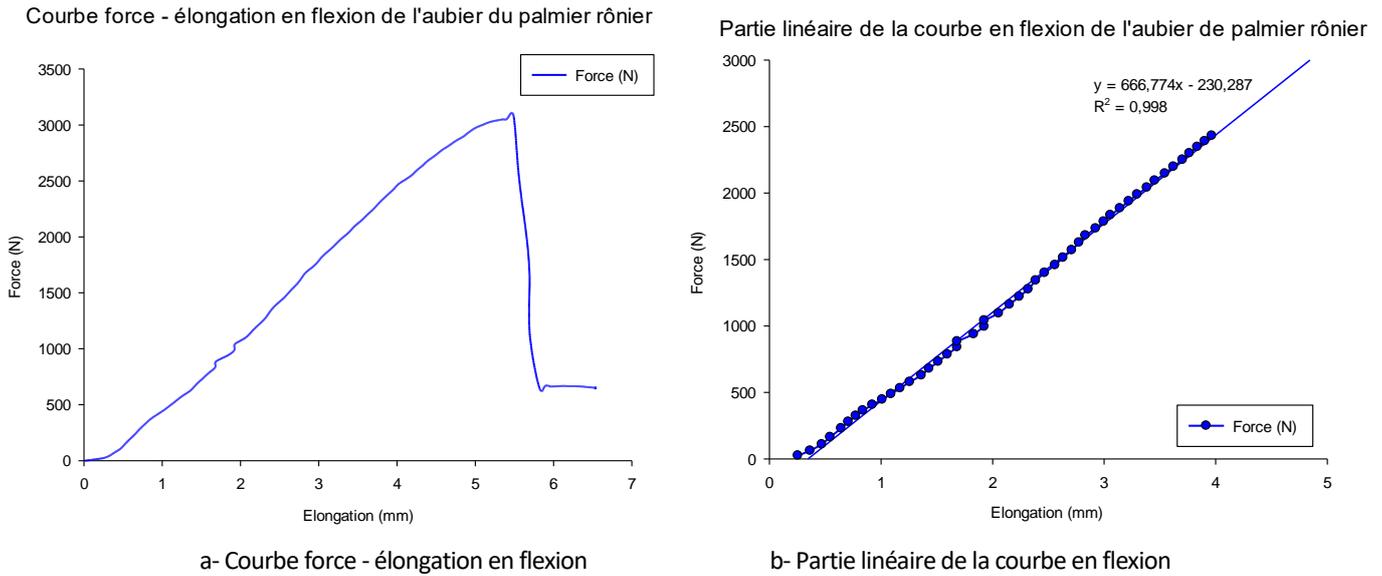


Fig. 15. La courbe de comportement de l’aubier du palmier rônier en flexion

Tableau 2. Valeurs moyennes des caractéristiques mécaniques calculées en compression et en flexion de l’aubier du palmier rônier

Essai	Contrainte à la rupture (Mpa)	Déformation à la rupture (%)	Module d'élasticité (Mpa)
Compression longitudinale	58,290 ± 3,582	0,041 ± 0,018	1 386,470 ± 41,661
Compression transversale	29,210 ± 1,775	0,285 ± 0,103	209,418 ± 6,456
Flexion trois points	74,789 ± 5,171	2,845 ± 0,383	3 434,548 ± 82,195

Le Tableau 3 présente une comparaison des valeurs moyennes en compression et en flexion trois points de l’aubier du palmier rônier avec d’autres auteurs. On constate les résultats obtenus sont comparables à ceux de Ngargueudedjim et al., (2015) et très supérieures à ceux de Djoudi et al., (2018). Par contre, on note une importante dispersion des valeurs du module d’Young. Ceci pourrait être dû à plusieurs facteurs tels que la grande diversité des palmiers rôniers étudiés, la différence des dimensions des éprouvettes utilisées et les conditions expérimentales. Ce palmier rônier peut être utilisé comme renfort dans les matériaux composites et dans les éléments d’isolation.

Tableau 3. Comparaison des valeurs moyennes en compression et en flexion trois points de l’aubier du palmier rônier avec d’autres auteurs

	Contrainte à la rupture (Mpa)			Auteurs
	Compression longitudinale	Compression transversale	Flexion 3 points	
Palmier rônier	69,89 ± 3,64	14,78 ± 0,01	71	[30]
	58,290 ± 3,582	29,210 ± 1,775	74,789 ± 5,171	Présente étude
Palmier dattier	3,70 ± 0,42	3,85±0,04	10,33 ± 2,36	[31]
	Module de Young E (Mpa)			Auteurs
	Compression longitudinale	Compression transversale	Flexion 3 points	
Palmier rônier	5 603,22 ±129,80	285,83 ±13,39	6 333,89	[30]
	1 386,470 ± 41,661	209,418 ± 6,456	3 434,548 ± 82,195	Présente étude
Palmier dattier	0,224±0,069 (GPa)	0,067±0,014 (GPa)	0,585±0,001 (GPa)	[31]

3.2.3 CARACTÉRISATION THERMIQUE

L'effusivité thermique, la capacité thermique et la conductivité thermique sont calculées à partir des données expérimentales. Ces résultats sont présentés dans le Tableau 4. Il ressort de ce dernier que l'aubier du rônier est un excellent isolant de la chaleur de faible conductivité thermique comprise entre 0,610 et 0,673 W/mK et d'une effusivité thermique comprise entre 441,246 et 466,345 J/m²Ks^{1/2}.

Tableau 4. Propriétés thermiques de l'aubier de palmier rônier

Echantillon	E		ρC_p		Λ		Ecart
	Effusivité thermique (J/m ² Ks ^{1/2})		Capacité thermique volumique (J/m ³ K)		Conductivité thermique (W/mK)		
	Simplifié	Complet	Simplifié	Complet	Simplifié	Complet	
B1	446,783	462,276	326122,720	320026,892	0,612	0,668	8,336
B2	449,215	458,230	322427,569	321028,457	0,626	0,654	4,313
B3	441,246	445,904	324331,557	326128,442	0,600	0,610	1,536
B4	446,721	466,345	326129,778	323327,009	0,612	0,673	9,028
Moyenne	445,991	458,189	324752,906	322627,700	0,613	0,651	5,803

On peut conclure que la conductivité thermique moyenne de ce bois est de $0,65 \pm 5,803 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Le Tableau 5 ci-dessous présente une comparaison des valeurs moyennes des caractéristiques thermiques de l'aubier du palmier rônier avec d'autres auteurs. Ces résultats obtenus et ceux de la littérature montrent une importante dispersion avec d'autres auteurs. Ceci est dû à la différence des méthodes de caractérisation et l'orientation de la source de chaleur par rapport à celle des fibres.

Tableau 5. Comparaison des propriétés thermiques des palmiers

Echantillon	E		ρC_p		Λ		Auteurs
	Effusivité thermique (J/m ² Ks ^{1/2})		Capacité thermique volumique (J/m ³ K)		Conductivité thermique (W/mK)		
	Simplifié	Complet	Simplifié	Complet	Simplifié	Complet	
	445,991	458,189	324752,906	322627,700	0,613	0,651	Présente étude
Borassus	Axiale	682,01	/	/	/	/	
Aéthiopum	Radiale	600,63	/	/	/	/	[32]
	Tangentielle	557,95	/	/	/	/	
		/	/	/	0,1176	/	[7]

4 CONCLUSION

Cet article a visé la caractérisation physico-mécanique et thermique du palmier rônier du type *Borassus aethiopum mart*. Dans un premier temps, la détermination expérimentale de la masse volumique en fonction de la teneur en eau a été réalisée par pondération et a montré l'influence de la masse volumique par la teneur en eau. A différente température de séchage, la masse volumique de l'aubier est comprise entre 750 et 1 000 kg.m⁻³ et celle du duramen varie de 300 à 400 kg.m⁻³. Ces résultats permettent de classer le duramen du palmier de rônier étudié dans la catégorie des bois lourds et l'aubier dans celle des bois très lourds. Cette étude établie des corrélations améliorées qui expriment des approximations au premier ordre de la masse volumique et de la porosité en fonction du taux d'humidité des échantillons et de la température ambiante. Par ailleurs, une évaluation expérimentale la rétractabilité du palmier rônier a été réalisée dont celle volumique varie de 6 à 9 % et de 5 à 14 % respectivement pour l'aubier et le duramen. Par conséquent, l'aubier constitue la partie du rônier à faible retrait volumique, par contre le duramen est à fort retrait volumique. Cette étude montre en outre que la porosité diminue lorsque la masse volumique et la teneur en eau augmente. A l'état anhydre, la porosité de l'aubier est comprise entre 38 et 52 % alors que celle du duramen varie de 76 à 80 %. Deuxièmement, l'évaluation des caractéristiques mécaniques du *Borassus aethiopum mart*. fournie comme valeurs moyennes du module d'Young en compression longitudinale et transversale respectivement de 1 386,470 MPa et de 209,418 MPa. En flexion trois point il est de 3 434,548 MPa. La contrainte moyenne à la rupture en compression longitudinale et transversale est de 58,290 MPa et de 29,210 MPa respectivement. Cette valeur en flexion est de 74,789 MPa. Ces résultats permettent son utilisation dans le génie civil, les briques de terre comprimées et stabilisées et les adobes. Enfin, la valeur moyenne de l'effusivité thermique est de 458,189 J/m²Ks^{1/2}, la capacité thermique volumique est de 322 627,7 J/m³K et la conductivité thermique est de $0,65 \pm 5,803 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Cette valeur semble élevée à cause de la faible anisotropie à l'instar des essences de bois

tropicaux. En comparaison à d'autres matériaux structuraux, le palmier rônier peut être classé parmi les meilleurs matériaux pour le confort thermique dans un habitat à pression atmosphérique. Des analyses microstructurales de nos échantillons pourraient être affinées afin de rendre le palmier rônier du type *Borassus aethiopum mart.* plus compétitif.

REFERENCES

- [1] P.-L. Giffard, « Le Palmier Ronier *Borassus aethiopum Mart.* », *Bois et Forêts des Tropiques*, n° 116, p. 3-13, 1967.
- [2] O. Eyog-Matig, O. Ndoye, J. Kengue, et A. Awono, *Les fruitiers forestiers comestibles du Cameroun*. Cotonou, Bénin: International Plant Genetic Resources Institute (IPGRI) Regional Office for West and Central Africa, 2006. Consulté le: 30 mars 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/19693>.
- [3] P. Bellouard, « Le rônier en A.O.F | Bois & Forêts des Tropiques », *Bois for. trop.*, vol. 14, n° 14, Art. n° 14, juin 1950, doi: 10.19182/bft1950.14.a18408.
- [4] W. Gschladt, « Le Rônier au Dallol-Maouri, Niger », *Bois for. trop.*, vol. 145, n° 145, Art. n° 145, oct. 1972, doi: 10.19182/bft1972.145.a19147.
- [5] M. GIBIGAYE *et al.*, « Etude ethnobotanique et usages mécaniques du rônier (*Borassus aethiopum mart*) au Bénin », *Annales des Sciences Agronomiques*, vol. 13, n° 2, Art. n° 2, 2010.
- [6] K. LOLO, S. TIEM, et S. BANAKINAO, « Valorization of the *Borassus Aethiopum* wood behavior in tensile and bending », *Research Journal of Engineering Sciences*, vol. 6, n° 11, p. 20-29, déc. 2017.
- [7] N. K. Ernest, D. Haman, et S. C. D'Ouazzane, « Determination of thermal and physical properties of palmyra wood (*Borassus aethiopum mart.*) from MALFANA in CHAD », *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET)*, vol. 6, n° 12, p. 49-58, déc. 2015.
- [8] N. Kimtandar, G. Tao, et G. E. Ntamack, « Study of the correlation between fiber and mechanical properties of wood *Borassus aethiopum mart.* of CHAD », *WOOD RESEARCH*, vol. 64, n° 2, Art. n° 2, 2019.
- [9] K. Ngargueudedjim, A. Malignan, G. E. Ntamack, B. Bassa, F. G. Gazawa, et S. C. D'Ouazzane, « Thermophysical and Mechanical Characterization of Composites from Wood Palmyra Residues », *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 13, n° 2, Art. n° 2, 2018.
- [10] J. B. Acheampong, « Physico - chemical properties and natural durability within Two varieties of *Borassus aethiopum* », MSc. Wood Science and Technology, Kwame Nkrumah University of Science and Technology, Kumasi-GHANA, 2014. Consulté le: 13 septembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://ir.knust.edu.gh/handle/123456789/9466>.
- [11] American Society for Testing and Materials, « ASTM D143-94 Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber ». 16 août 2017. doi: 10.1520/D0143-94.
- [12] Normes Françaises et Européennes, « NF B51-016 Bois - Flexion statique - Détermination du module d'élasticité en flexion statique de petites éprouvettes sans défaut. » décembre 1987. Consulté le: 25 juillet 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-b51016/bois-flexion-statique-determination-du-module-delasticite-en-flexion-statiq/fa035907/3887>.
- [13] Normes Françaises et Européennes, « NF ISO 13061-17 Propriétés physiques et mécaniques du bois - Méthodes d'essais sur petites éprouvettes de bois sans défauts - Partie 17 : détermination de la... » 2017. Consulté le: 26 juillet 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-iso-1306117/proprietes-physiques-et-mecaniques-du-bois-methodes-dessais-sur-petites-epr/fa175055/80889>.
- [14] International Organization for Standardization, « ISO 13061-5 : Propriétés physiques et mécaniques du bois — Méthodes d'essais sur petites éprouvettes de bois sans défauts — Partie 5: Détermination de la résistance en compression perpendiculaire au fil ». 2020. Consulté le: 26 juillet 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iso.org/fr/standard/74335.html>.
- [15] C. Babé, K. D. Kidmo, Ahmat Tom, R. R. Ngono Mvondo, B. Kola, et N. Djongyang, « Effect of neem (*Azadirachta Indica*) fibers on mechanical, thermal and durability properties of adobe bricks - ScienceDirect », *Energy Reports*, p. 686-698, 27 juillet 2021.
- [16] M. Nitcheu, P. Meukam, J. C. Damfeu, et D. Njomo, « Thermomechanical Characterisation of Compressed Clay Bricks Reinforced by Thatch Fibres for the Optimal Use in Building », *Materials Sciences and Applications*, vol. 09, n° 12, Art. n° 12, nov. 2018, doi: 10.4236/msa.2019.912066.
- [17] J. C. Damfeu, P. Meukam, Y. Jannot, et E. Wati, « Modelling and experimental determination of thermal properties of local wet building materials », *Energy and Buildings*, vol. 135, p. 109-118, janv. 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.11.022.
- [18] J. L. Nsouandele, J. G. Tamba, B. Bonoma, et L. Bikanda, « Experimental Determination of Volume Masses of Some Tropical Timbers Function of Their Moisture and the Temperature: Case Study of IROKO (*ChlorophoraExcelsa*), SAPELLI (*EntandrophragmaCylindricum*), SIPO (*Entandrophragma Utile*), BUBINGA (*GuibourliaLessmannii*), AZOBE (*LophiraAlata*), EBONY (*DiospyrosCrassiflora*) », *International Journal of Science and Research (IJSR)*, vol. 5, n° 12, Art. n° 12, 2016.
- [19] S. EKOMY ANGO, D. LABASSOU HARA, BAKITA MOUSSAVOU, S. IKOGOU, et R. MOUTOU PITTI, « Cinétique de séchage des bois tropicaux : application à l'Okoumé, au Movingui et au paddouk », présenté à 4èmes journées du GDR 3544 « Sciences du bois », Clermont-Ferrand, nov. 2015.

- [20] K. Ngargueudedjim, L. Djidengar, G. E. Ntamack, et W. Nzie, « Etude des caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques du pétiole du rônier du Tchad - ProQuest », *International Journal of Innovation and Applied Studies*, vol. 26, n° 4, p. 1134-1146, juill. 2019.
- [21] Y. E. N. Béhi, M. Mollet, O. Girardin, J.-P. Sorg, et F. Herzog, « Le vin de palme, aliment et source de revenu pour les populations rurales en Côte d'Ivoire | Palm Wine: dietary component and source of income for the rural population of the Ivory Coast », *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, vol. 153, n° 4, p. 123-129, avr. 2002, doi: 10.3188/szf.2002.0123.
- [22] K. Lolo, A. Afio, S. Banakinao, K. Attipou, et S. Tiem, « Contribution to the Determination of the Elasticity Modules of a Material (*Borassus Aethiopum*) based on an Experimental Method: Effort (Force) /Elongation or Moment/Degree ratio », *International Journal of Engineering Research*, vol. 5, n° 10, 2019.
- [23] J. Gérard, A. Edi Kouassi, C. Daigremont, P. Détienne, D. Fouquet, et M. Vernay, *Synthèse sur les caractéristiques technologiques de référence des principaux bois commerciaux africains*. Montpellier: CIRAD-Forêt, 1998. Consulté le: 7 mars 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://agritrop.cirad.fr/515643/>.
- [24] M. Simo Tagne, B. Bonoma, et M. Siaka, « Experimental and theoretical study of drying kinetic, of diffusion coefficient and density of ayous », *Physical and Chemical News*, vol. 49, p. 65-73, sept. 2009.
- [25] V. Gbaguidi, A. Gbaguidi, M. Gibigaye, E. Adjovi, B. Sinsin, et T. Amadji, « Détermination expérimentale des principales caractéristiques physiques et mécaniques du bois du rônier (*borassus aethiopum* Mart.) d'origine béninoise », *Jnl Rech Sci*, vol. 12, n° 2, juill. 2011, doi: 10.4314/jrsul.v12i2.68046.
- [26] K. Ngargueudedjim *et al.*, « Caractéristiques physiques du bois Rônier (*Borassus aethiopum* Mart., Arecaceae) du Tchad / Afrique Centrale », *International Journal of Innovation and Applied Studies*, vol. 13, n° 3, Art. n° 3, nov. 2015.
- [27] J. B. Acheampong *et al.*, « Physical properties of palmyra palm wood for sustainable utilization as a structural material », *Maderas. Ciencia y tecnología*, vol. 24, n° 8, p. 1-14, 2022, doi: 10.4067/s0718-221x2022000100408.
- [28] G. Jean, G. Daniel, C. Jean-Claude, P. Sébastien, et 40 Auteurs, *Atlas des bois tropicaux - Caractéristiques technologiques et utilisations*, 1ère édition. in Guide pratique. Quae, 2016. Consulté le: 6 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.quae.com/produit/1408/9782759225521/atlas-des-bois-tropicaux>.
- [29] B. Bonoma, M. Simo Tagne, et L. Monkam, « Influence de la température et de l'humidité sur la masse volumique et sur la porosité des bois tropicaux : Ayous, Baobab, Sapelli, Lotofa et Padouk », *Physical Chemistry News*, p. 79-83, 2010.
- [30] K. Ngargueudedjim *et al.*, « Mechanical characteristics of tall-palm (*Borassus Aethiopum* Mart., Arecaceae) of Chad / Central Africa ».
- [31] T. Djoudi, M. Hecini, D. Scida, Y. Djelbloun, et B. Guerira, « Caractérisation physique et mécanique du bois et des fibres issus d'une palme mûre de palmier dattier », *Matériaux & Techniques*, vol. 106, n° 4, Art. n° 4, 2018, doi: 10.1051/mattech/2018056.
- [32] C. Ahouannou *et al.*, « Détermination expérimentale et approches simplifiées de modélisation des propriétés thermo-physiques du bois borassus (Palmier Ronier) », *Journal de la Recherche Scientifique de l'Université de Lomé*, vol. 16, n° 2, Art. n° 2, 2014, doi: 10.4314/jrsul.v16i2.