THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

En Mécanique et Génie Civil

École doctorale Information Structures Systèmes

Unité de recherche Biomasse, Bois, Energie, Bio-produits - CIRAD

Influence des variations climatiques sur la croissance et la qualité du bois de deux essences des zones semi-arides tchadiennes : *Faidherbia albida* (Del.) A. Chev. *et Balanites aegyptiaca* (L.) Delile

Présentée par Dao DOUGABKA

Le 18 / 07 / 2022

Sous la direction de Rémy MARCHAL, Professeur Emérite

Jean GERARD, Chercheur CIRAD

et Tikri BIANZEUBE, Maître de conférences CAMES

Devant le jury composé de

Adzo Dzifa KOKUTSE, Professeur, Université de Lomé (Togo)	Présidente du jury	Rapporteuse
Joseph GRIL, Directeur de Recherche, Institut Pascal, Clermont-Ferrand		Rapporteur
Bruno CLAIR, Directeur de Recherche, Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC)		Examinateur
Delphine JULLIEN, Maître de conférences, Université de Montpellier		Examinatrice
Loïc BRANCHERIAU, Chercheur, CIRAD Montpellier		Examinateur
Anna DUPLEIX, Chargée de Recherche, Université Paul-Valéry		Examinatrice
Rémy MARCHAL, Professeur Emérite, HESAM Cluny		Directeur de thèse
Tikri BIANZEUBE, Maître de conférences CAMES, Université Polytechnique de Mongo (Tchad)		Encadrant
Jean GERARD, Chercheur, CIRAD Montpellier		Invité
Kévin CANDELIER, Chercheur, CIRAD Montpellier		Invité

UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

A mon feu père GONZABO DAO Joël

Remerciements

Ce travail de thèse est le résultat de plus de trois années de recherche réalisées au sein de l'Unité Propre de Recherche *Biomasse Bois Energie Bioproduits* (BioWooEB) du CIRAD.

L'occasion m'est donnée d'exprimer à travers ces quelques lignes mes remerciements à tous ceux qui ont, d'une manière ou une autre, contribué à la réussite de ce travail.

Je vais commencer ces remerciements par Delphine JULLIEN et Anna DUPLEIX qui m'ont fait découvrir le domaine du bois et qui m'ont accompagné vers cette aventure que constitue la réalisation d'une thèse.

Je n'arrive pas à trouver les mots justes pour exprimer ma reconnaissance à cette personne qui a été toujours présente du début à la fin de cette histoire. Malgré ses multiples occupations, il a su ménager son temps pour l'encadrement de cette thèse. Monsieur Jean GERARD, du fond du cœur, je vous dis merci. Merci Professeur pour votre bienveillance, vos conseils et aides multiformes qui m'ont permis d'aller au bout de ce travail. Mes chaleureux remerciements au Professeur Rémy MARCHAL pour avoir accepté de diriger cette thèse malgré un emploi du temps très chargé. Mes vifs remerciements au Professeur Tikri BIANZEUBE qui, malgré la distance, ses multiples occupations et toutes les difficultés techniques au Tchad a su apporter sa contribution pour ce travail.

Mes sincères remerciements à Olivier ROUPSARD, Morgane DENDONCKER et Caroline VINCKE pour nous avoir fourni des échantillons prélevés au Sénégal.

Je remercie l'Ambassade de France au Tchad pour le financement partiel de cette thèse à travers le service de coopération et d'action culturelle représenté par Jean-Guy SARKIS puis Sylvain LAMOURETTE.

J'adresse mes sincères remerciement à Daniel GUIBAL, Alban GUYOT, Sylvain LOTTE, Patrick LANGBOUR, Jérémy VALETTE, Charline LANVIN, Sophie NOURISSIER-MOUNTOU, Kévin CANDELIER, Julien RUELLE, Benjamin NIEZ, Ilhem BENTALEB, Tancrède ALMERAS pour leurs contributions dans la réalisation des essais que j'ai menés à bien pour ce travail de thèse. Je remercie également Isabelle CHALON, Marie-France THEVENON, Loïc BRANCHERIAU, Luc PIGNOLET ainsi que tous les personnels du CIRAD qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué au succès de ce travail.

Je remercie ma mère Anne TCHONFABO, mes frères, mes sœurs, mes oncles, mes ami(e)s, et toutes les personnes qui ont été là pour moi pendant ce moment.

Résumé

Faidherbia albida et *Balanites aegyptiaca* sont deux espèces caractéristiques et emblématiques de la zone semi-aride tchadienne. Elles revêtent une grande importance socio-économique dans toutes leurs zones naturelles de répartition du fait de leurs multiples usages.

La présente étude de nature exploratoire a consisté à comprendre le déterminisme des variations des caractéristiques du bois des deux espèces en relation avec leurs variations de conditions de croissance. Sa finalité est de mieux connaitre l'hétérogénéité de comportement technologique des bois de ces deux espèces afin de mieux les valoriser dans les processus de reboisement et d'élargir leur domaine d'utilisation locale.

L'étude a été réalisée selon deux approches. La première a consisté à déterminer par des méthodes conventionnelles et normalisées une sélection de caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques des bois prélevés dans deux zones climatiques tchadiennes (zone sahélienne et zone soudanienne) et une zone climatique sénégalaise (zone sahélienne), et à étudier leurs variations en fonction des conditions de croissance liées essentiellement aux différences climatiques. La seconde a consisté à étudier les variations radiales de caractéristiques physiques, mécaniques, et de la composition isotopique de carbone 13 ($\delta^{13}C$), ceci en fonction de la croissance des arbres, par des mesures réalisées sur des micro-échantillons prélevés au niveau des cernes.

Les résultats du premier volet de l'étude ont mis en évidence pour les deux espèces des tendances variables pour toutes les caractéristiques étudiées.

Pour *Faidherbia albida*, l'infradensité, la masse volumique, les retraits de séchage et les trois caractéristiques mécaniques étudiées sont significativement plus élevés dans la zone sahélienne sénégalaise que dans les deux provenances tchadiennes. Cette même tendance est observée pour les taux d'extractibles et de lignine, mais les taux de cellulose et d'hémicellulose sont significativement plus élevés dans la zone sahélienne tchadienne.

Pour *Balanites aegyptiaca*, les tendances sont variables suivant les propriétés, avec un effet inverse des provenances pour le retrait tangentiel et le retrait radial, et aucune tendance marquée pour le retrait volumique. Le point de saturation des fibres est faible pour les trois provenances (inférieur à 25 %). En zone soudanienne tchadienne, la masse volumique est significativement plus élevée que dans les deux autres zones, alors que la contrainte de rupture en compression et le module d'élasticité longitudinal sont moins élevés. Les taux de lignine et d'hémicellulose sont plus élevés en zone sahélienne tchadienne.

Une analyse des extractibles par GC-MS a mis en évidence des différences marquées entre les deux espèces d'une part et les trois provenances d'autre part. Ces différences pourraient être mises en relation avec celles observées entre provenances et espèces pour certaines propriétés physiques et mécaniques du bois telles que les retraits de séchage, le PSF, la masse volumique et le module d'élasticité. L'effet de chaque extractible sur ces propriétés resterait cependant à établir, en tenant compte des probables impacts conjugués de ces différents composés.

Le second volet de l'étude a montré que l'accroissement moyen était légèrement supérieur en zone soudanienne qu'en zone sahélienne ce qui reflète les différences de conditions climatiques qui impactent la croissance des arbres.

Pour *Faidherbia albida*, l'absence de différence significative de $\delta^{13}C$ entre les deux provenances peut s'expliquer par le fait que cette espèce est une phréatophyte. Pour *Balanites aegyptiaca*, le $\delta^{13}C$ moyen dans la zone sahélienne est significativement inférieur à celui de la zone soudanienne, tendance inverse à celle à laquelle on pouvait s'attendre. Ce résultat tend à montrer que cette espèce présente une bonne efficacité et une bonne stratégie opportuniste d'utilisation de l'eau.

L'étude des relations entre les variables prises deux à deux a donné des résultats contrastés. L'absence de relation entre la largeur de cerne et la pluviométrie peut être liée à plusieurs causes : pluviométrie sur les sites de prélèvement des bois différente de celle de la station météorologique éloignée de ces sites, comportement phréatophile avéré de *Faidherbia albida* et possible pour *Balanites aegyptiaca*, et délimitation incertaine des cernes liée à leur structure.

Les perspectives de recherche à venir sur les deux espèces sont multiples, et concernent aussi bien le protocole d'échantillonnage (utilisation de branches au lieu de troncs), l'étude des rythmes de croissance afin de comprendre le phénomène de disparition/fusion partielle des cernes, que l'élargissement de l'étude à d'autres provenances.

Abstract

Faidherbia albida and *Balanites aegyptiaca* are two characteristic and emblematic species of the semi-arid zone of Chad. They are of great socio-economic importance in all their natural areas of distribution due to their multiple uses. The present exploratory study consisted in understanding the determinism of variations in the wood characteristics of the two species in relation to their variations in growth conditions. The aim is to gain a better understanding of the heterogeneity of the technological behaviour of the wood of these two species in order to make better use of them in reforestation processes and to broaden their field of local use. The study was carried out using two approaches. The first consisted in determining, using conventional and standardized methods, a selection of physical, mechanical and chemical characteristics of wood taken from two Chadian climatic zones (Sahelian zone and Sudanian zone) and one Senegalese climatic zone (Sahelian zone), and in studying their variations according to growing conditions linked essentially to climatic differences. The second consisted of studying the radial variations in physical and mechanical characteristics and in the isotopic composition of carbon 13 ($\delta^{13}C$), as a function of tree growth, by means of measurements taken from micro-samples in the tree rings.

The results of the first part of the study showed variable trends for both species for all the characteristics studied.

For *Faidherbia albida*, infradensity, density, drying shrinkage and the three mechanical characteristics studied are significantly higher in the Senegalese Sahelian zone than in the two Chadian provenances. The same trend is observed for extractives and lignin content, but cellulose and hemicellulose content are significantly higher in the Chadian Sahelian zone.

For *Balanites aegyptiaca*, the trends are variable across properties, with an inverse effect of provenances for tangential and radial shrinkage, and no marked trend for volumetric shrinkage. The fibre saturation point is low for all three provenances (below 25%). In the Chadian Sudanian zone, the density is significantly higher than in the other two zones, while the compression strength and the longitudinal modulus of elasticity are lower. Lignin and hemicellulose levels are higher in the Chadian Sahelian zone.

GC-MS analysis of extractives showed marked differences between the two species on the one hand and the three provenances on the other. These differences could be related to those observed between provenances and species for certain physical and mechanical properties of wood such as drying shrinkage, PSF, density and modulus of elasticity. However, the effect of

each extractable on these properties remains to be established, taking into account the probable combined impacts of these different compounds.

The second part of the study showed that the average increment was slightly higher in the Sudanian zone than in the Sahelian zone, which reflects the differences in climatic conditions that affect tree growth.

For *Faidherbia albida*, the lack of significant difference in $\delta^{13}C$ between the two provenances can be explained by the fact that this species is a phreatophyte. For *Balanites aegyptiaca*, the average $\delta^{13}C$ in the Sahelian zone is significantly lower than in the Sudanian zone, a trend that is the opposite of what would be expected. This result tends to show that this species has a good efficiency and opportunistic water use strategy.

The study of the relationships between the variables taken in pairs gave contrasting results. The lack of relationship between ring width and rainfall can be linked to several causes: rainfall at the wood collection sites different from that of the weather station far from these sites, proven phreatophile behaviour of *Faidherbia albida* and possible for *Balanites aegyptiaca*, and uncertain delimitation of the rings linked to their structure.

Future research prospects for the two species are multiple, and concern the sampling protocol (use of branches instead of trunks), the study of growth rhythms in order to understand the phenomenon of partial disappearance/merger of rings, and the extension of the study to other provenances.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS ..... **II**

RESUME ..... **III**

ABSTRACT ..... **V**

1 INTRODUCTION GENERALE **1**

2 ETAT DE L'ART **7**

2.1 CROISSANCE DES ARBRES ET QUALITE DU BOIS 8

2.1.1 Croissance des arbres 8

2.1.2 Qualité du bois 9

2.1.2.1 Propriétés physiques 10

2.1.2.1.1 Masse volumique, densité et infradensité 10

2.1.2.1.2 Point de saturation des fibres 10

2.1.2.1.3 Retraits linéaires transversaux et retrait volumique de séchage 11

2.1.2.1.4 Anisotropie de retrait de séchage 12

2.1.2.1.5 Angle des microfibrilles (AMF) 12

2.1.2.2 Propriétés mécaniques 13

2.1.2.2.1 Module d'élasticité longitudinal 13

2.1.2.2.2 Contrainte de rupture en flexion statique 13

2.1.2.2.3 Contrainte de rupture en compression 13

2.1.2.3 Constituants chimiques 13

2.1.2.3.1 La cellulose 14

2.1.2.3.2 Les hémicelluloses 14

2.1.2.3.3 Les lignines 14

2.1.2.3.4 Les extractibles 14

2.1.2.3.5 Les minéraux 14

2.1.3 Facteurs de variabilité de la qualité du bois 15

2.1.3.1 Impact des facteurs climatiques sur la croissance des arbres et la qualité du bois 15
2.1.3.1.1 Impact des facteurs climatiques sur la croissance des arbres 15
2.1.3.1.2 Influence de la croissance des arbres sur la qualité du bois 15
2.1.3.2 Mesure de l'impact des facteurs climatiques sur la croissance des arbres 16
2.1.3.2.1 Approche dendrochronologique 17
2.1.3.2.2 Analyse dendro-isotopique 19
2.2 TCHAD : CLIMAT ET VEGETATION 22
2.2.1 Climat et variations climatiques 23
2.2.2 Variations climatiques au Tchad et projections à court terme 23
2.2.2.1 Evolution de la température 23
2.2.2.2 Variations pluviométriques 24
2.2.3 Végétation du Tchad 25
2.2.4 Les ressources forestières du Tchad 28
2.3 ETAT DES CONNAISSANCES SUR *FAIDHERBIA ALBIDA* ET *BALANITES AEGYTIACA* 29
2.3.1 *Faidherbia albida* 29
2.3.1.1 Ecologie et distribution 30
2.3.1.2 Caractères *botaniques* 32
2.3.1.3 Croissance de la plante 32
2.3.1.4 Sylviculture 33
2.3.1.5 Structure anatomique du bois 33
2.3.1.6 Caractéristiques technologiques du bois et usages 34
2.3.2 *Balanites aegyptiaca* 36
2.3.2.1 Ecologie et distribution naturelle 36
2.3.2.2 Caractère botanique 37
2.3.2.3 Croissance de *Balanites aegyptiaca* 38

2.3.2.4 Sylviculture de *Balanites aegyptiaca* 39
2.3.2.5 Structure anatomique du bois de *Balanites aegyptiaca* 39
2.3.2.6 Caractéristiques technologiques du bois et usages 40
2.4 CONCLUSION DE L'ETAT DE L'ART, OBJECTIFS ET AXES DE RECHERCHE RETENUS 41
3 MATERIEL ET METHODES 43
3.1 PRESENTATION DES ZONES D'ETUDE 44
3.1.1 Domaine sahélien tchadien : N'Djamena (Tchad) 44
3.1.2 Domaine soudanien tchadien : Léré (Tchad) 45
3.1.3 Domaine sahélien sénégalais : Diourbel et Widou Thiengoly (Sénégal) 47
3.2 ECHANTILLONNAGE 47
3.3 METHODES EXPERIMENTALES 51
3.3.1 Essais conventionnels de caractérisation du bois 51
3.3.1.1 Usinage des éprouvettes massives et obtention des poudres d'analyses chimiques 51
3.3.1.1.1 Usinage des éprouvettes massives pour la mesure des caractéristiques physiques et mécaniques 51
3.3.1.1.2 Poudres de bois pour les analyses chimiques 53
3.3.1.1.3 Usinage des éprouvettes pour la mesure d'angle de microfibrilles (AMF) 55
3.3.1.2 Détermination des caractéristiques physiques 55
3.3.1.3 Mesure de l'angle des microfibrilles par diffraction à rayon X 60
3.3.1.4 Caractéristiques mécaniques 61
3.3.1.5 Caractéristiques chimiques 66
3.3.2 Caractérisation du bois en fonction de la croissance des arbres 72
3.3.2.1 Préparation des échantillons 72
3.3.2.1.1 Eprouvettes de microdensitométrie 72
3.3.2.1.2 Eprouvettes de micromécanique 73
3.3.2.1.3 Echantillons de mesures isotopiques 74

3.3.2.2 Déroulement des expérimentations 75
3.3.2.2.1 Analyse des cernes par microdensitométrie 75
3.3.2.2.2 Micromécanique 77
3.3.2.2.3 Analyse isotopique des cernes de croissance 79
3.4 METHODES STATISTIQUES 79
4 RESULTATS ET DISCUSSION 80
4.1 CARACTERISTIQUES CONVENTIONNELLES DU BOIS 81
4.1.1 Statistiques descriptives et effets des provenances sur les propriétés étudiées 81
4.1.1.1 *Balanites aegyptiaca* 81
4.1.1.1.1 Résultats généraux 82
4.1.1.1.2 Influence des provenances sur les propriétés étudiées 83
4.1.1.1.3 Qualification des bois de *Balanites aegyptiaca* étudiés par rapport à d'autres provenances 89
4.1.1.2 *Faidherbia albida* 90
4.1.1.2.1 Résultats généraux 91
4.1.1.2.2 Influence des provenances sur les propriétés étudiées 92
4.1.1.2.3 Positionnement des bois de *Faidherbia albida* étudiés par rapport à d'autres provenances 98
4.1.1.3 Résultats d'études similaires conduite en région sèche sur la variation des caractéristiques du bois en fonction de la provenance 100
4.1.2 Caractérisation des extractibles par GC-MS 101
4.1.3 Conclusions sur l'étude des caractéristiques conventionnelles de *Balanites aegyptiaca* et *Faidherbia albida* 104
4.2 EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES DES BOIS EN FONCTION DE LA CROISSANCE DES ARBRES 106
4.2.1 Structure morphologique des cernes du bois de *Faidherbia albida* et de *Balanites aegyptiaca* 106

4.2.2 Etude méthodologique exploratoire des rapports isotopiques de carbone 13 ($\delta^{13}C$) déterminés sur de la poudre de bois, de la cellulose et de la lignine 108

4.2.3 Etudes dendrochronologique et dendro-isotopique..... 111

4.2.3.1 Variations interannuelles de la croissance et des $\delta^{13}C$ en fonction des zones climatiques 112

4.2.3.2 Autocorrélation d'ordre 1 sur les séries chronologiques de largeur de cerne 114

4.2.3.3 Relation entre les variables étudiées..... 116

4.2.3.3.1 Relation entre pluviométrie et largeur des cernes..... 116

4.2.3.3.2 Relation entre largeur des cernes et la masse volumique..... 120

4.2.3.3.3 Relation entre largeur des cernes et $\delta^{13}C$ 122

4.2.3.3.4 Relation entre la largeur des cernes, le module d'élasticité longitudinal et la contrainte de rupture en flexion..... 125

4.2.4 Conclusions sur l'étude de l'évolution des caractéristiques des bois en fonction de la croissance des arbres..... 127

5 CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES 130

5.1 CONCLUSION GENERALE..... 131

5.2 PERSPECTIVES 134

6 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... 137

7 ANNEXES 148

8 ARTICLES PUBLIES 162

1 Introduction générale

Le bois est un matériau composite dont la structure et l'organisation sont sans doute parmi les plus sophistiquées qui puissent exister, et souvent inégalées en comparaison des matériaux de synthèse. Ce matériau hygroscopique est caractérisé par son anisotropie et par la très importante diversité de ses propriétés et de ses comportements. Il est communément admis qu'il n'existe pas de « bon bois » ni de « mauvais bois » mais uniquement des bois qui présentent des caractéristiques adaptées à un ou plusieurs usages donnés.

Le choix d'un bois d'œuvre parmi la multitude d'espèces disponibles, espèces tempérées ou espèces tropicales, sera fonction de ses propriétés technologiques (propriétés physiques, chimiques, mécaniques, anatomiques, biologiques) qui doivent être en adéquation avec les usages envisagés.

La formation du bois, et en conséquence ses qualités technologiques, est notamment régie par les conditions environnementales des zones de croissance des peuplements arborés. Le déterminisme de la répartition des espèces d'arbres dans leur aire naturelle de croissance est directement lié à ces conditions environnementales.

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire concernent des espèces de zone sèche disponibles au Tchad.

Ce pays se caractérise par trois grandes zones climatiques : la zone désertique, la zone sahélienne et la zone soudanienne. Chaque zone climatique est associée à un type de paysage et de végétation caractéristique, mais certaines espèces d'arbre sont présentes dans toutes les zones climatiques. Parmi ces espèces, *Faidherbia albida* et *Balanites aegyptiaca*, qui présentent un caractère emblématique dans toute la région et dont le bois constitue l'objet de cette étude.

Le contexte et les enjeux associés aux travaux de recherche engagés sont liés aux conséquences du phénomène de dérèglement climatique qui s'accentue d'année en année, notamment dans les pays de la bande sahélienne, pays qui sont naturellement et tout particulièrement exposés aux aléas climatiques. Ce dérèglement climatique, essentiellement d'origine anthropique, a un impact direct ou indirect sur tous les êtres vivants de la planète, animaux ou végétaux.

Le Tchad est un des pays de la bande sahélienne où les effets de ce changement climatique sont parmi les plus marqués, avec des conséquences très visibles sur la flore et la faune. Pour les végétaux, on assiste à trois phénomènes bien visibles qui montent en puissance : la mortalité accrue de certaines espèces, l'adaptation due probablement à un changement de fonctionnement physiologique, voire génétique, et la migration.

Face à cette situation, il est apparu crucial que des actions de reboisement soient lancées afin de régénérer l'écosystème et lutter contre le phénomène de désertification, conséquence directe du dérèglement climatique.

Vers les années 70, le Tchad et la plupart des pays de la bande sahélienne (Niger, Mali, Burkina Faso, Sénégal…) ont bénéficié de plusieurs programmes de reboisement.

Ces programmes n'ont pas eu le succès escompté notamment du fait du choix des espèces utilisées peu adaptées à la réalité locale, et du manque de suivi des reboisements. Quelques années après leur mise en place, ils ont été abandonnés.

Au Tchad, les espèces végétales endémiques sont de plus en plus vulnérables au dérèglement climatique, notamment en relation avec une pluviométrie de plus en plus déficitaire.

En conséquence, ces essences endémiques doivent faire l'objet d'investigations approfondies, notamment celles qui paraissent bien adaptées et semblent réagir favorablement aux évolutions environnementales actuelles, et qui présentent un intérêt pour les populations locales, ceci afin de les valoriser dans un processus de reboisement suivi.

Pour nos travaux de recherche, nous avons ciblé les espèces *Faidherbia albida* et *Balanites aegyptiaca* pour les raisons suivantes :

* Large distribution naturelle et présence dans toutes les zones climatiques tchadiennes.

* Intérêt de ces deux arbres pour les chercheurs dans une large gamme de thématiques scientifiques notamment du fait de leur comportement adaptatif remarquable en réaction aux contraintes externes et de leur physiologie particulière (notamment phénologie inversée de *F. albida*).

* Essences à usages multiples et d'intérêt majeur en agroforesterie pour les populations locales.

Faidherbia albida. Ses feuilles et ses fruits servent à l'alimentation du bétail (Kini, 2018). Son bois tendre de couleur jaune clair est utilisé pour la fabrication d'objets d'art (sculpture), d'ustensiles de cuisine (pilon, mortier, calebasse…), dans la construction de cases et de greniers, et comme source d'énergie. Ses écorces et racines sont utilisées en médecine traditionnelle. La plante est particulièrement remarquable par sa capacité à améliorer la qualité des sols ; Sileshi (2016), Yengwe *et al*. (2018), et Dilla *et al*. (2019) montrent ainsi que la présence de *Faidherbia albida* sur des parcelles de culture accroit la fertilité des sols : (1) en fixant l'azote de l'air, comme c'est le cas de beaucoup de Fabaceae ; (2) en prélevant des sels minéraux dans le sol profond pour les faire migrer vers la surface (caractère phréatophile de

l'espèce). Du fait de sa phénologie inversée, cette espèce porte les feuilles, les fleurs et les fruits en saison sèche, et les perd totalement en saison des pluies ce qui facilite son association à d'autres cultures et en fait un arbre idéal pour l'agroforesterie (Depommier, 1998 ; Roupsard *et al.*, 1998).

Balanites aegyptiaca. Plusieurs parties de l'arbre (feuille, pulpe des fruits, amande) ont des utilisations multiples : usage alimentaire, applications médicinales, élaboration de poisons utilisés pour la pêche, fabrication de savon pour la lessive, d'encre, de teinture pour les cuirs (Creac'h, 1940 ; Le Floc'h et Aronson, 2013 ; Dendoncker *et al.*, 2015 ; Adamou *et al*., 2020). Le bois de cette espèce est utilisé dans la construction, en menuiserie, pour la fabrication d'instruments de musique, comme source d'énergie…

Faidherbia albida et *Balanites aegyptiaca* sont donc deux espèces de première importance au Tchad et dans toute la zone soudano-sahélienne. Du fait de l'intérêt qu'elles présentent dans leur aire naturelle de répartition, et de leur capacité à résister à la sécheresse, nous allons dans le cadre de ce travail étudier l'impact des conditions environnementales de croissance sur les caractéristiques technologiques des bois de deux essences afin de mieux les valoriser dans le processus de reboisement.

Les travaux ont été organisés suivant deux approches :

1. Détermination par des méthodes conventionnelles et normalisées d'une sélection de caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques des bois prélevés dans deux zones climatiques tchadiennes (zone sahélienne et zone soudanienne) et dans une zone climatique sénégalaise (zone sahélienne), et étude des variations de ces caractéristiques en fonction de facteurs externes, principalement les conditions de croissance liées essentiellement aux différences climatiques. L'objectif de cette première étude est de comprendre l'influence des conditions environnementales du milieu de croissance sur les plantes étudiées, les échantillons prélevés étant considérés comme issus d'arbres de même race.

2. Etude des variations radiales de caractéristiques physiques, mécaniques, et chimiques en fonction des variations de la croissance du bois par des méthodes d'investigations spécifiques : microdensitométrie (variations de la largeur des cernes de croissance et de la masse volumique du bois le long du rayon), analyse micromécanique (variations du module d'élasticité longitudinal et de la contrainte de rupture en flexion le long du rayon), et analyse des variations

des rapports isotopiques pour le carbone. L'objectif de ce second volet de notre étude est de connaitre la sensibilité des arbres étudiés aux variations climatiques.

Le présent document est organisé en quatre grands chapitres :

1. Un état de l'art sur les modalités de croissance des arbres, les éléments caractéristiques de la qualité du bois et de sa variabilité, l'influence des facteurs climatiques sur la qualité du bois, une présentation du principal terrain d'étude que constitue le Tchad, puis une présentation détaillée des deux essences objet de l'étude.

2. La présentation du matériel expérimental et des méthodes d'étude et d'essais utilisées, avec successivement un descriptif des zones d'échantillonnage au Tchad et au Sénégal, puis de l'échantillonnage en lui-même (sur un plan qualitatif et quantitatif), des essais conventionnels de caractérisation du bois, puis des essais spécifiques mis en œuvre pour étudier l'évolution des caractéristiques du bois en fonction de sa croissance.

3. Les résultats obtenus, leur analyse et leur interprétation, ceci pour chacune des deux essences étudiées, successivement pour les caractéristiques physico-mécaniques puis chimiques déterminées de façon conventionnelle par des essais normalisés, puis pour l'étude des variations radiales de caractéristiques en fonction de la croissance des arbres (étude intra-cernes) par méthodes microdensitométrique, micromécanique et par analyse des rapports isotopiques.

4. Une conclusion générale et une présentation des perspectives de recherches à venir.

Les travaux de recherche engagés sur les deux espèces étudiées présentent un caractère exploratoire du fait : (1) de la nature même des deux essences ciblées qui jusqu'à présent n'avaient fait l'objet que de très peu d'investigations quant aux variations de la qualité de leur bois ; (2) du faible échantillonnage utilisé pour l'ensemble des essais réalisé.

Sur ce deuxième point, il est nécessaire de préciser que depuis 2008, l'état tchadien a strictement interdit la coupe des arbres pour tous les usages, exceptés lorsque les arbres et les bois sont destinés à des travaux de recherche scientifique. Dans ce dernier cas, une autorisation de l'administration forestière est nécessaire, autorisation accordée à l'issue d'un long processus de décisions administratives successives qui peut être assimilé à un long « parcours du combattant ». L'administration forestière décide alors du nombre d'arbres à prélever par espèce et cadre de façon stricte les lieux de prélèvement. Ceux-ci doivent être réalisés en présence et sous le contrôle d'un agent de cette administration.

Le caractère limité de l'échantillonnage utilisé au Tchad a pu être partiellement compensé par des spécimens prélevés au Sénégal dans des régions au climat comparable à celui des régions tchadiennes de prélèvement.

Des spécimens sénégalais de *Faidherbia albida* nous ont ainsi été aimablement mis à disposition par l'UMR Eco & Sols du CIRAD (par le Dr Olivier Roupsard positionné à Dakar).

De même, des spécimens sénégalais de *Balanites aegyptiaca* nous ont été mis à disposition par le *Earth & Life Institute* de l'Université catholique de Louvain qui avait été amené à conduire une étude sur certains points comparables à la nôtre sur cette même espèce.

Ces échantillons ont été utilisés pour la partie de notre étude portant sur les variations des caractéristiques des bois déterminées par méthodes conventionnelles et normalisées.

2 Etat de l’art

2.1 Croissance des arbres et qualité du bois

2.1.1 Croissance des arbres

La croissance d'un arbre résulte de la division de groupes de cellules indifférenciées appelées méristèmes. On distingue deux types de croissance, la croissance primaire et la croissance secondaire.

La croissance primaire correspond à un accroissement longitudinal de la plante. Elle résulte de la division active des méristèmes primaires ou méristèmes apicaux.

La croissance secondaire, appelée encore croissance cambiale correspond à l'augmentation en diamètre de la tige ou de la racine de la plante. Elle est le résultat de l'activité des deux méristèmes latéraux, le cambium du liège appelé aussi phellogène ou assise subéro-phellodermique, et le cambium vasculaire. Le bois formé par la croissance secondaire se présente sous forme d'anneaux concentriques autour de la moelle, les cernes. Les cernes correspondent à la quantité de bois produit au cours d'une année de croissance (figure 2.1). Ils permettent de définir l'âge de l'arbre, et fournissent des informations sur les aléas climatiques que la plante a subis pendant sa croissance (pluviométrie, température, exposition au soleil, vent…).

En climat tempéré, les limites des cernes du bois sont toujours visibles chez les résineux, avec des exceptions chez les feuillus. On distingue généralement deux zones dans les cernes : une zone correspondant à la croissance de printemps où le bois produit est le bois initial ou bois de printemps (bois poreux donc plus clair), et une seconde zone correspondant à la croissance en été, le bois final ou bois d'été (bois plus dense et plus foncé).

En climat tropical, les cernes du bois sont souvent peu marqués, voire inexistants (Tarhule et Hughes, 2002).

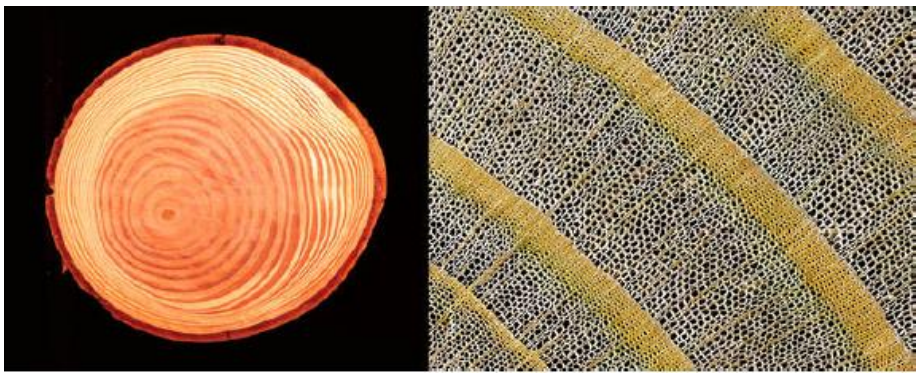


Figure 2.1. Les cernes du bois (Cailloce, 2016).

Une coupe transversale d'un tronc d'arbre permet de visualiser la structure du bois formé à différentes échelles. A l'échelle macroscopique, de l'extérieur vers l'intérieur, on distingue l'écorce, le liber ou phloème, le cambium, l'aubier et le duramen. A l'échelle microscopique, on observe les vaisseaux, les fibres, les parenchymes, les rayons et les ponctuations. A l'échelle de l'ultrastructure on retrouve les différentes couches cellulaires (lamelle mitoyenne, les couches S1, S2 et S3) et les différentes molécules constitutives du bois (cellulose, hémicellulose, lignine...) (figure 2.2).

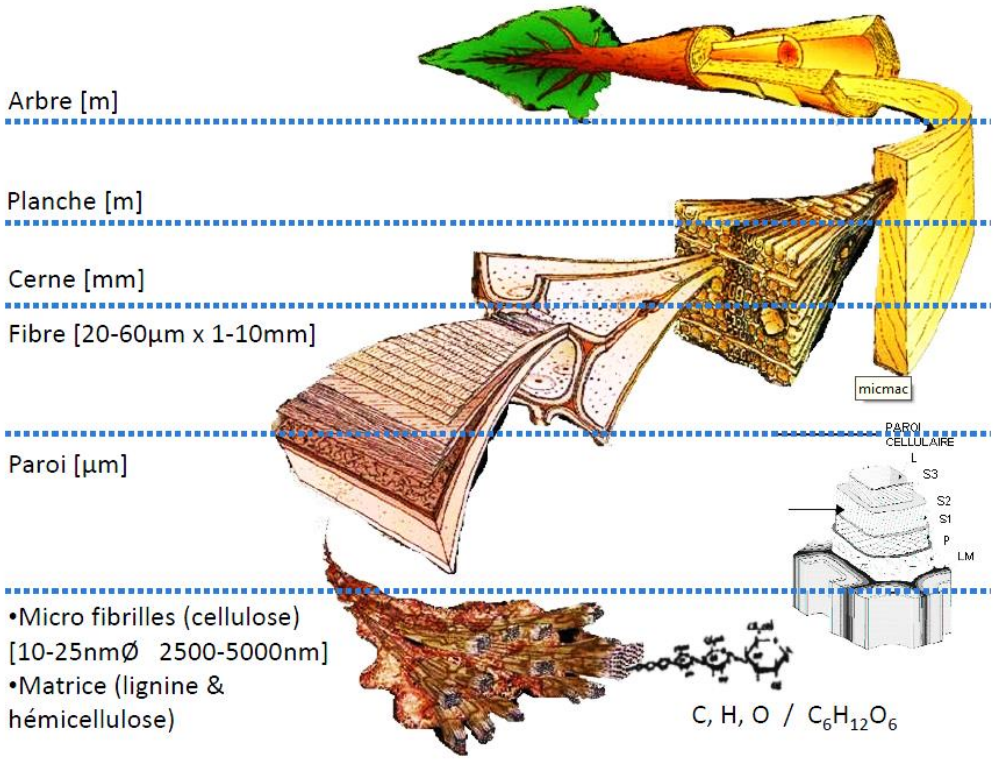


Figure 2.2. Représentation de Warrington

2.1.2 Qualité du bois

La notion de qualité bois est définie par Nepveu (1995) comme l'ensemble des propriétés (propriétés anatomiques, chimiques, physiques, mécaniques, durabilité naturelle, imprégnabilité …) qui conditionnent les aptitudes technologiques du matériau. Nous allons nous intéresser dans cette partie aux propriétés physiques, mécaniques et chimiques couramment déterminées pour qualifier le bois.

2.1.2.1 Propriétés physiques

Les propriétés physiques du bois que nous allons présenter sont celles que nous avons mesurées sur les bois étudiés : la masse volumique, la densité, l'infradensité, l'humidité, le point de saturation des fibres, les retraits de séchage et l'anisotropie de retrait. Ce sont les principaux indicateurs physiques à déterminer pour connaitre les aptitudes technologiques d'un bois.

2.1.2.1.1 Masse volumique, densité et infradensité

- La masse volumique d'un échantillon de bois est le rapport entre sa masse M et son volume V. Elle s'exprime en kilogramme par mètre cube (kg/m^3).

Le bois est un matériau hygroscopique, sa masse et son volume varient en fonction de son taux d'humidité. La masse volumique du bois doit toujours être associée au taux d'humidité auquel elle est déterminée. La masse volumique à environ 12 % d'humidité (taux d'humidité théorique pour des bois stabilisés à 20°C et 65% d'humidité relative de l'air) est la référence pour les opérateurs de la filière bois.

- La densité du bois est le rapport entre sa masse volumique et la masse volumique de l'eau (1000 kg/m^3). Elle est utilisée indifféremment avec la masse volumique pour qualifier le bois. Ainsi, utiliser comme grandeur de référence la densité permet de s'affranchir du choix des unités de la masse volumique qui peuvent être complexes, notamment dans le système anglo-saxon (livre par pouce cube, livre par pied cube, *board-foot* …) (Guibal *et al*., 2015).

La densité est la caractéristique technologique de référence pour qualifier un bois, elle est considérée comme le meilleur indicateur de la qualité globale du bois. Elle est corrélée plus ou moins étroitement avec les principales propriétés physiques et mécaniques du bois.

- L'infradensité ou la masse volumique basale est le rapport entre la masse anhydre et le volume saturé en eau d'un échantillon de bois. Elle s'exprime en kg/m^3. C'est une caractéristique de référence qui présente l'avantage d'être facile à déterminer lorsque l'on ne dispose pas d'enceinte climatique pour stabiliser des échantillons à des conditions de température et d'humidité de l'air contrôlées.

2.1.2.1.2 Point de saturation des fibres

L'eau dans le bois se présente sous trois formes : (1) l'eau de constitution qui est un élément chimique du bois et fait partie intégrante de la matière ligneuse, et qui se libère par dégradation thermique du matériau ; (2) L'eau libre ou eau capillaire présente en phase liquide dans les lumens du bois et qui est la première à s'évacuer pendant le séchage du bois ; (3) L'eau liée

qui imprègne les parois cellulaires où elle est adsorbée au niveau des polymères, et dont l'élimination lors du séchage entraine les variations dimensionnelles du bois (retraits de séchage).

Le Point de Saturation des Fibres (PSF) est le taux d'humidité du bois saturé en eau liée, taux en dessous duquel le bois subit des variations dimensionnelles dues aux variations d'humidité ambiante. Le PSF est un très bon indicateur du comportement du bois durant le séchage et de sa stabilité dimensionnelle après mise en œuvre (ou réciproquement de sa nervosité), lors d'échanges d'humidité entre le matériau et le milieu ambiant (Derbal *et al.*, 2015). Il varie le plus souvent entre 20 % et 40 % suivant les essences, mais se situe généralement aux environs de 25 à 30 % (Guibal et *al*., 2015).

2.1.2.1.3 Retraits linéaires transversaux et retrait volumique de séchage

Le bois est un matériau hygroscopique, ses dimensions varient avec son taux d'humidité en dessous du point de saturation des fibres. Cette variation dimensionnelle n'est pas la même suivant les trois directions du bois (longitudinale, tangentielle et radiale). Trois retraits linéaires de séchage sont ainsi définis, le retrait radial (R_R), le retrait tangentiel (R_T) et le retrait longitudinal (R_L). R_R et R_T caractérisent le retrait transversal du bois.

Le retrait radial se produit perpendiculairement à la direction des fibres et suivant la direction des rayons. Sa valeur est toujours inférieure au retrait tangentiel (Panshin et Zeeuw, 1980).

Le retrait tangentiel se produit tangentiellement aux cernes de croissance et perpendiculairement à la direction de la fibre. Il peut dépasser 3 fois la valeur du retrait radial.

Le retrait tangentiel et le retrait radial sont habituellement déterminés pour qualifier le comportement du bois pendant le séchage ou sa mise en œuvre (Guibal *et al*., 2015).

Le retrait longitudinal (R_L) se produit parallèlement au fil du bois, sa valeur est généralement très faible par rapport au retrait tangentiel et radial (Panshin et Zeeuw, 1980 ; Pliura *et al*, 2005). Il est de l'ordre de quelques dixièmes de pour cent. Cependant, il peut avoir une influence notable sur les variations dimensionnelles de pièces de grandes longueurs. Très peu de données sont disponibles sur cette caractéristique qui reste délicate à mesurer en laboratoire (Guibal *et al.*, 2015).

Les retraits linéaires de séchage ($R_{R/T/L}$) sont le plus souvent déterminés entre l'état saturé et l'état anhydre, parfois entre l'état saturé et un taux d'humidité intermédiaire. Ils s'expriment en pourcentage.

Le retrait volumique total de séchage R_B est un indicateur des variations du volume d'une pièce de bois. La somme des retraits radial et tangentiel donne une bonne approximation du retrait volumique total, puisque le retrait longitudinal est très faible par rapport aux deux retraits transversaux (Guibal *et al.*, 2015).

2.1.2.1.4 Anisotropie de retrait de séchage

Le caractère anisotrope du bois se retrouve dans l'ensemble de ses propriétés, notamment ses retraits de séchage. Le rapport entre le retrait tangentiel et le retrait radial est le plus souvent compris entre 1,5 à 2,5. C'est le cas de 69 % des séries d'essais dont les résultats sont disponibles dans la base de données Bois du Cirad, correspondant à 620 espèces pour lesquelles ces caractéristiques ont été mesurées. Le retrait axial est de l'ordre de 50 fois plus faible que le retrait tangentiel. Cette anisotropie est due à la disposition des microfibrilles dans la paroi cellulaire d'une part, et d'autre part à l'alternance du bois de printemps et du bois d'été dans le cerne d'accroissement pour les bois tempérés. L'anisotropie de retrait est un bon indicateur du niveau de déformations subies par une pièce de bois soumise à des variations d'humidité, et de la stabilité d'un bois durant son séchage et sa mise en service. Lorsque le rapport R_T/R_R est supérieur à 2, on estime qu'un bois risque d'être instable et sujet aux fentes et aux déformations. En général, un bois est d'autant plus stable que ce rapport tend vers 1 (Guibal *et a*l., 2015).

2.1.2.1.5 Angle des microfibrilles (AMF)

Les microfibrilles sont les unités structurelles des parois cellulaires végétales. Chaque microfibrille contient des chaines groupées de glucose entourées d'hémicelluloses de faible poids moléculaire.

La couche S2 contient la plus grande partie de la cellulose dans le bois. Elle forme la masse essentielle de la paroi cellulaire. L'inclinaison ou l'angle des microfibrilles dans cette couche influence les propriétés physiques et mécanique du bois. Le caractère anisotrope du bois provient en grande partie de cette inclinaison. En général, plus l'AMF est faible, plus la fibre est solide et rigide. La mesure de l'angle des microfibrilles peut notamment permettre de comprendre la variabilité de certaines caractéristiques en relation avec des facteurs génétiques, ontogéniques ou environnementaux.

2.1.2.2 Propriétés mécaniques

Les bois mis en œuvre dans les ouvrages à vocation structurelle, ou dans toutes autres applications autres que la construction, sont soumis à des degrés divers à des contraintes mécaniques, ceci en fonction de leurs utilisations. Il est donc important de connaître le comportement du bois sous l'effet de ces contraintes.

Le caractère anisotrope du bois contribue à la variabilité de ces propriétés selon le sens de l'application de l'effort : suivant la direction axiale, le bois est plus résistant que suivant les deux directions transversales. La mesure de ces caractéristiques se fait de façon standard sur des éprouvettes normalisées à environ 12 % d'humidité (bois stabilisés à 20 °C et 65 % d'humidité relative).

2.1.2.2.1 Module d'élasticité longitudinal

Le module d'élasticité longitudinal du bois E_L détermine sa capacité à se déformer de manière élastique. C'est un indicateur de rigidité du matériau, il caractérise la proportionnalité entre la charge et la déformation.

Le bois est un matériau anisotrope et orthotrope, son module d'élasticité est différent suivant les trois directions (longitudinale, tangentielle et radiale). Il est plus élevé dans la direction longitudinale (sens du fil) que dans les directions radiale et tangentielle, on a donc $E_L > E_R > E_T$ (Jodin, 1994).

2.1.2.2.2 Contrainte de rupture en flexion statique

La contrainte de rupture en flexion statique correspond à l'effort qu'il faut appliquer dans la zone centrale d'une éprouvette de dimension standard reposant sur deux appuis pour atteindre sa rupture après un chargement progressif. Cette caractéristique est notée F_{12} ou σ_{12}.

2.1.2.2.3 Contrainte de rupture en compression

La contrainte de rupture en compression parallèle (C_{12}) est obtenue en divisant la charge à la rupture par la section transversale de l'éprouvette. Cette caractéristique est déterminée suivant une procédure normalisée sur des éprouvettes stabilisées à 12 % d'humidité.

2.1.2.3 Constituants chimiques

Le bois est constitué chimiquement de composés macromoléculaires (principalement cellulose, hémicelluloses, et lignine), de composés à faible poids moléculaire (extractibles), et de substances minérales.

2.1.2.3.1 La cellulose

La cellulose est le principal constituant des végétaux. Elle représente 40 à 45 % de la masse de la matière ligneuse. C'est un polysaccharide, c'est-à-dire un polymère constitué d'unités monosaccharides. Les microfibrilles sont constituées de molécules de cellulose. Ce constituant confère au bois sa résistance mécanique.

2.1.2.3.2 Les hémicelluloses

Les hémicelluloses sont des polymères amorphes ramifiés. Elles représentent 20 à 25 % de la masse du bois. Elles sont constituées de sucres variés dont les principaux sont les pentoses, les hexoses, les déoxy-hexoses et les acides uroniques. Elles diffèrent de la cellulose par des chaînes moléculaires beaucoup plus courtes et par des ramifications sur la chaîne principale.

Les celluloses et hémicelluloses sont les principales molécules constitutives de la paroi cellulaire des végétaux.

2.1.2.3.3 Les lignines

Les lignines sont des macromolécules amorphes, non saccarides, de structure tridimensionnelle issue de la polymérisation de trois monomères précurseurs : les alcools p-coumarylique, conifé rylique, sinapylique. Elles représentent 20 à 25 % de la masse du bois. Elles contribuent à la rigidité des parois cellulaires, réduit leur perméabilité et rend le bois résistant à l'attaque des agents d'altération. Selon Boyd (1974), les lignines ont un effet gonflant sur la paroi cellulaire et réduisent sa tendance à se contracter en épaisseur.

2.1.2.3.4 Les extractibles

Les extractibles sont des constituants non structurels du bois pouvant être extraits par des solvants organiques ou par l'eau (Hart, 1989). Ils représentent moins de 5% de la masse du bois. Ce sont des composés non lignocellulosiques donc le rôle est notamment de protéger la plante contre les attaques extérieures d'agents biologiques de détérioration tels que les insectes et les champignons.

2.1.2.3.5 Les minéraux

Les minéraux sont les constituant résiduels qui composent les cendres après une combustion complète. Parmi ces minéraux, la silice contribue à la protection des bois contre les insectes et les foreurs marins.

2.1.3 Facteurs de variabilité de la qualité du bois

Le bois est un matériau hétérogène et anisotrope donc les propriétés sont très variables. Cette variabilité peut s'observer entre les espèces, au sein d'une même espèce, et à l'intérieur de l'arbre. Plusieurs facteurs sont à l'origine de cette variabilité. Ces facteurs peuvent être internes ou externes à l'arbre.

Les facteurs externes correspondent à toutes les variations du milieu qui impactent la croissance de l'arbre. Il s'agit des facteurs climatiques, édaphiques, et biologiques.

Les facteurs internes sont de deux types : génétique et ontogénique.

Nos travaux sont principalement axés sur l'étude de l'influence du facteur climatique sur les caractéristiques étudiées.

2.1.3.1 Impact des facteurs climatiques sur la croissance des arbres et la qualité du bois

2.1.3.1.1 Impact des facteurs climatiques sur la croissance des arbres

La température et la pluviométrie sont deux paramètres climatiques qui influencent de façon majeure la croissance des arbres. De nombreuses études ont montré que le stress hydrique ralentit la croissance des arbres en hauteur ou en diamètre (Aussenac, 1978 ; Keller, 1993 ; Aussenac, 2000 ; Breda *et al.,* 2004 ; Manise et Vincke, 2014 ; …). Ce ralentissement s'accompagne de plusieurs modifications de la structure anatomique du bois tel que la réduction du diamètre des vaisseaux ou la formation de cernes étroits et parfois non uniformes sur la section (Mariaux 1969 ; 1970).

2.1.3.1.2 Influence de la croissance des arbres sur la qualité du bois

La croissance de l'arbre influence significativement la qualité du bois produit. On distingue à l'intérieur du cerne de plusieurs espèces d'arbres le bois initial peu dense et le bois final beaucoup plus dense. Les proportions relatives de chacun de ces deux types de bois dans le cerne, variables à l'intérieur d'un même individu, affectent directement les propriétés du bois telles que la couleur, le grain, la texture, la densité, le retrait, l'aptitude au séchage, à l'usinage, à la finition… (Till 1986 ; Traoré 2009).

Rosner *et al*. (2008) mentionnent que la croissance des épicéas en zone humide engendre une allocation de biomasse plus importante ce qui implique de meilleures performances mécaniques du bois afin d'assurer le support du houppier.

Leclercq (1977) montre que l'augmentation de la masse volumique du hêtre va de pair avec une accélération de sa croissance, associée à des vaisseaux peu nombreux, longs, étroits et des fibres longues à lumen réduit.

Barry-Lenger *et al* (1999) indiquent que les arbres qui échappent à la concurrence de leurs voisins (arbres d'alignement ou à houppier étendu) grossissent vite et donnent naissance à un bois plus tendre, moins nerveux, plus clair que celui des arbres qui ont été dominés ou dont la croissance a été plus ou moins entravée. Dans ce dernier cas, les cernes sont plus fins mais le bois est plus fibreux, plus coloré et plus dense.

Leclercq (1983) rapporte que l'accélération de la croissance chez le hêtre engendre sur le plan qualitatif, une diminution de longueur des fibres et des vaisseaux, un accroissement du lumen des fibres et des vaisseaux ainsi qu'une réduction de l'épaisseur des parois des fibres ; sur le plan quantitatif, on a une réduction de la porosité (par une diminution du nombre des vaisseaux par unité de surface) et une augmentation de la proportion de fibres. On obtient ainsi un bois à faible retrait avec une amélioration de la résistance mécanique. Le bois de hêtre est donc considéré comme de bonne qualité lorsque sa croissance est rapide et soutenue.

Polge (1972) montrent qu'une accélération de la croissance du chêne induit une dégradation de la qualité de son bois, ce qui implique un risque certain à faire pousser plus rapidement cette essence par des moyens culturaux.

Les exemples d'études citées montrent qu'une croissance, qu'elle soit rapide ou lente, impacte la qualité du bois. Une croissance rapide peut être dans certains cas favorable (hêtre), et dans certains cas défavorable (chêne).

2.1.3.2 Mesure de l'impact des facteurs climatiques sur la croissance des arbres

Deux principales méthodes peuvent être utilisées pour étudier la réponse des arbres au climat. La première est la dendrochronologie, la plus couramment utilisée. Cette méthode scientifique permet en particulier d'obtenir des datations de pièces de bois à l'année près en comptant et en analysant la morphologie des cernes annuels de croissance des arbres. Cette méthode est valable sur les bois tempérés ayant des cernes particulièrement bien marqués du fait de l'arrêt de végétation hivernal. Elle permet également de reconstituer les changements climatiques et environnementaux. La seconde méthode est la dendro-isotopie qui consiste à analyser les isotopes stables de carbone, d'hydrogène, d'oxygène, d'azote… des cernes de bois, et de faire le lien entre les résultats obtenus et les données climatiques.

2.1.3.2.1 Approche dendrochronologique

La dendrochronologie consiste à mesurer la largeur des cernes annuels de croissance de l'arbre et à les dater précisément. L'analyse se fait sur des barrettes radiales sur lesquelles les cernes sont lisibles. Ces barrettes sont obtenues par usinage de carottes ou de rondelles de bois. Cette méthode de mesure permet de mettre en relation les indicateurs de croissance de l'arbre et les variables climatiques.

Elle a été largement employée sur les essences des zones tempérées, dont les régions méditerranéennes, pour étudier les relations entre la qualité du bois et les caractéristiques climatiques.

Ainsi, Zhang et Romane (1991) montrent que l'existence de faux cernes chez *Quercus ilex* L, phénomène fréquent chez cette espèce, est favorisée par des précipitations estivales : l'épaisseur des cernes est liée positivement aux précipitations estivales.

Dans leur étude sur 15 populations de *Quercus canariensis* et *Quercus afares* des massifs forestiers de l'Akfadou et de Beni-Ghobri (Algérie), Messaoudene et Tessier (1997) ont analysé la variation de l'épaisseur des cernes en relation avec le climat. Les auteurs ont trouvé que *Quercus afares* apparaît très peu sensible aux fluctuations interannuelles du climat alors que la croissance de *Quercus canariensis* est davantage dépendante de ces mêmes fluctuations.

Sur cinq *Quercus suber* de Tunisie, Ennajah *et al*. (2010) mettent en évidence la sensibilité accrue de l'espèce aux facteurs climatiques. Leurs résultats ont montré que la pluviosité intervient de façon prédominante dans la phase précédant la mise en place du cerne, mais de façon variable selon les stations. Le facteur thermique joue un rôle mineur par rapport au facteur pluviométrique, même pour les populations d'altitude.

Sur neuf populations de Pin d'Alep dans le massif de l'Ouarsenis (Nord-Ouest de l'Algérie), Sarmoum *et al.,* (2016) montrent que les variations interannuelles des épaisseurs de cernes dépendent des précipitations de la période précédant ou contemporaine à la formation du cerne, les températures impactant négativement la croissance radiale, surtout par leurs valeurs maximales.

Sur des pistachiers prélevés dans la région de Djebel Meddad en Algérie, Ifticene-Habani et Abdoun (2018) ont montré que tous les cernes minces ou larges correspondent respectivement à des conditions de croissance sèches ou pluvieuses.

L'approche dendrochronologique a été moins couramment appliquée à l'étude des bois tropicaux du fait des difficultés effectives ou supposées à déceler et repérer les cernes annuels liées à l'absence de saisons bien différenciées (Détienne *et al*., 1998). Une des premières études dendrochronologiques conduite en région tropicale fut celle de Coster (1928), réalisée entre 1922 et 1926 sur des Tecks prélevés en Indonésie. Le résultat de cette étude a montré l'existence des cernes annuels sur cette espèce.

Mariaux (1967 ; 1969 ; 1970 ; 1975) a étudié la nature et la périodicité des cernes dans les bois tropicaux africains. L'étude réalisée en 1967 a montré que la croissance des arbres est saisonnière et coïncide avec la période de foliaison ; elle peut être perturbée par des facteurs exogènes comme la sécheresse, l'attaque d'insectes… Pour la majorité des espèces étudiées, la limite des cernes est marquée par une ligne fine et continue de parenchyme, et par de gros vaisseaux pour quelques essences comme le Teck. Pour les études de 1969 et 1970 sur le Limba et l'Okoumé, il ressort que la croissance des deux essences est saisonnière avec un repos du cambium pendant la période de sécheresse. Les cernes sont annuels, leurs limites sont marquées par une ligne fine de parenchyme, mais ils ne sont pas uniformes sur toute la section de la tige, ce qui rend la datation difficile. Pour l'étude effectuée en 1975 sur *Acacia raddiana*, l'auteur a cherché à établir une correspondance entre les pluviométries annuelles moyennes des zones d'échantillonnage et les largeurs de cernes. Le résultat n'a pas montré de relation entre les deux facteurs. Cette absence de corrélation serait due au décalage entre les relevés pluviométriques et la zone d'échantillonnage lié à la distance qui sépare la station météorologique et le site d'étude (plus de 80 km).

Worbes (1989) a montré que la limite de croissance des légumineuses est marquée sur le bois par du parenchyme en bande.

Les travaux de Tarhule et Hughes (2002) ont permis d'identifier une série d'espèces ligneuses tropicales dont les cernes sont difficiles à analyser : *Lannea acida* A. Rich, *Lannea microcarpa* Eng., *Lespedeza velutina* (Bickn), *Sclerocarya birrea* (A. Rich.) Hochst, *Anogeissus leiocarpus* (DC.) Guill. & Perr, *Combretum glutinosum* auct, *Combretum micranthum* G. Don, *C. nigricans* Lepr. ex Guill. & Perr, *Clerodendrum paniculatum* L, *Terminalia laxiflora* Engl., *Terminalia macroptera* Guill & Perr, *Hymenocardia acida* (Delile) A. Chev, ***Faidherbia albida*** (Delile) A. Chev., *Acacia macrostachya Reichenb.ex DC,* Ficus sp., *Gardenia* sp. et ***Balanites aegytiaca*** (L.) Del.

Dezzeo *et al*. (2003) ont étudié la saisonnalité de croissance des bois de *Campsiandra laurifolia*, *Acosmiun nitens*, *Pouteria orinocoensis* et *Psidium ovatifolium* du Venezuela. La formation

annuelle des cernes a été déterminée en utilisant une analyse au radiocarbone. Cette analyse a montré que les cernes se forment annuellement. Pour toutes les espèces étudiées, les cernes de croissance étaient visibles à l'œil nu. Leur limite était marquée par des bandes de parenchyme marginal. Tous les arbres étudiés avaient une croissance lente avec un accroissement annuel inférieur à 2,5 mm.

Mbow *et al.,* (2013) ont montré dans leur étude sur neuf essences du Sénégal *Acacia macrostachya, Acacia seyal*, ***Balanites aegyptiaca***, *Combretum glutinosum, Cordyla pinnata, Pterocarpus erinaceus, Terminalia macroptera, Daniellia oliveri*, et *Combretum nigricans* que les cernes développés en période de sécheresse sont trop proches pour être discriminables. La sécheresse peut entraîner des déviations ou fusions de cernes qui s'opèrent de façon irrégulière.

Sur 14 et 12 rondelles de bois d'*Acacia tortilis* (Forsk.) *Hayne ssp. raddiana (Savi) Brenan* et d'*Acacia senegal (L.)Willd* prélevés dans la région de Ferlo au Nord du Sénégal, Ndiaye *et al*., (2020) ont montré que les deux espèces présentent des cernes de croissances distinctes marquées par des groupes de parenchymes qui rendent la lecture moins difficile. L'âge estimé des arbres prélevés était compris entre 17 et 20 ans.

2.1.3.2.2 Analyse dendro-isotopique

La dendro-isotopie consiste à étudier la composition des isotopes stables de carbone, d'oxygène, d'hydrogène, ou d'autres composés élémentaires comme le soufre ou l'azote, du bois prélevé dans des séries de cernes afin de décoder les informations climatiques qu'ils contiennent. Le bois est constitué essentiellement de carbone (en moyenne 50 %), d'oxygène (en moyenne 43 %) et d'hydrogène (en moyenne 6 %). Ces éléments possèdent chacun plusieurs isotopes. L'oxygène, par exemple, a trois isotopes stables ^{16}O (99,763 %), ^{17}O (0,0375 %) et ^{18}O (0,1995 %), chacun renfermant huit protons mais soit huit, soit neuf, soit dix neutrons. Ces isotopes ont des propriétés chimiques qualitativement identiques mais des masses légèrement différentes. De ce fait, les processus physiques, chimiques ou biologiques peuvent opérer un fractionnement entre les isotopes légers et les isotopes lourds, c'est-à-dire modifier la répartition des isotopes. Les isotopes légers vont se concentrer préférentiellement dans la phase la moins dense, c'est à dire dans la phase gazeuse plutôt que dans la phase liquide, ou dans la phase liquide plutôt que dans la phase solide (Couchoud, 2008). Les rapports isotopiques de l'oxygène, du carbone et de l'hydrogène portent ainsi une information environnementale (Daux, 2013). Le rapport isotopique d'un élément chimique noté delta (δ) est défini selon la formule suivante :

$$\delta\ (\text{échantillon}) = \left(\frac{R_{\text{échantillon}}}{R_{\text{standard}}} - 1\right) * 1000 \qquad (2.1a)$$

δ : s'exprime en pour mille (‰)

$R_{\text{échantillon}}$ est le rapport correspondant à la concentration de l'isotope rare par rapport à celui qui est abondant.

R_{standard} est la référence utilisée.

La référence standard utilisée pour le carbone est le PDB (*Pee Belemnite*). Il s'agit de rostres de bélemnites issus de la formation crétacée de Pee Dee en Caroline du Sud qui servent de référence pour le carbone et parfois l'oxygène. Son rapport isotopique est le suivant :

$$* \left(\frac{^{13}C}{^{12}C}\right)_{PDB} = 0{,}0112372$$

Le rapport isotopique de carbone est ainsi le suivant :

$$\Delta^{13}C\ (‰) = \frac{\left(\frac{^{13}C}{^{12}C}\right)_{Echantillon} - \left(\frac{^{13}C}{^{12}C}\right)_{PDB}}{\left(\frac{^{13}C}{^{12}C}\right)_{PDB}} * 1000 \qquad (2.1b)$$

Les isotopes stables du carbone contenu dans le bois sont des données exceptionnelles pour reconstituer les variations du climat sur les derniers siècles passés (McCarroll et Loader, 2004). En effet, le carbone dispose de 15 isotopes donc les trois principaux sont ^{12}C, ^{13}C et ^{14}C. Parmi ces trois isotopes, ^{12}C (98,89 %) et ^{13}C (1,11%) sont les plus stables car le ^{14}C est radioactif et se dégrade avec le temps. Grâce à cette stabilité, ^{12}C et ^{13}C sont considérés comme des archives climatiques qui témoignent des conditions du milieu pour chaque année (Mc Carroll et Loader, 2004). ^{12}C est le plus léger et le plus abondant des trois isotopes principaux. Pendant la photosynthèse, la plante capte le carbone pour son métabolisme. ^{12}C, plus léger, est le plus facilement assimilé et se déplace plus loin à l'intérieur de l'arbre par rapport à ^{13}C qui est plus lourd. Cette assimilation de carbone est fonction de la conduction du stomate qui est principalement liée aux conditions climatiques du milieu. Le processus biologique priorise l'absorption du ^{12}C. Quand la plante subit un stress hydrique, elle ferme partiellement ses stomates. L'ouverture stomatique ne permettant pas une acquisition suffisante de carbone, elle est contrainte d'utiliser du ^{13}C plutôt que du ^{12}C ce qui modifie le ratio isotopique dans le cerne.

De la même façon que la dendrochronologie, la technique d'analyse dendro-isotopique a été régulièrement utilisée pour étudier les bois des zones tempérées mais beaucoup moins fréquemment pour l'étude des bois tropicaux. Parmi les études disponibles, on peut citer celle de Fall *et al.* (1998) qui ont étudié les relations entre la teneur en ^{13}C dans des bois d'*Acacia*

albida (ex *Faidherbia albida*) prélevés dans les zones semi-arides et arides sénégalaises, et les paramètres climatiques des régions d'échantillonnage. Les résultats obtenus ont montré que les teneurs en ^{13}C dans la cellulose de cette espèce sont élevées, ce qui est indicateur de l'aridité des zones d'études. Des corrélations significatives ont été établies entre les données climatiques (pluviométrie et humidité relative) et le $\delta^{13}C$.

Sur des arbres riverains de la rivière Milo en Guinée, Condé *et al.* (2020) ont analysé les teneurs en isotopes ^{13}C et $^{18}0$ afin d'étudier les changements environnementaux auxquels ces arbres sont soumis. Les espèces étudiées sont *Pericopsis laxiflora*, *Tamarindus indica* et *Tectona grandis*. L'analyse a été réalisée sur la cellulose de chaque cerne bien distinct des arbres. Le rapport $\delta^{13}C$ renseigne sur le rendement photosynthétique de l'arbre et sa régulation hydrique, et $\delta^{18}O$ renseigne sur l'origine de l'eau utilisée par l'arbre. Les résultats obtenus ont permis de comprendre comment l'arbre riverain peut réguler sa consommation hydrique en fonction des conditions hydriques locales et faire appel à l'eau de la nappe alluviale pendant la période sèche.

Gebrekirstos *et al.,* (2012) ont étudié les isotopes stables de carbone et d'oxygène dans les cernes de croissance de *Sclerocarya birrea* de la région de Tougouri au Burkina Faso. L'étude a été réalisé sur de la poudre de bois de chacun des cernes des arbres étudiés. Six arbres ont été échantillonnés. Les résultats ont montré des corrélations négatives entre les isotopes de carbone et d'oxygène et les données pluviométriques et d'humidité. En revanche, des corrélations positives ont été mises en évidence avec les heures d'ensoleillement, les températures maximales et l'évaporation.

Gebrekirstos *et al.,* (2010) ont évalué la capacité de quatre essences agroforestière (*Acacia senegal, A.seyal, A.tortilis* et *Balanites aegyptiaca*) à s'adapter aux changements climatiques. L'échantillonnage est composé de 6 à 8 rondelles de chaque espèce prélevée à 170 km au sud d'Addis-Abeba en Ethiopie. Les mesures effectuées ont consisté à déterminer le taux de croissance, la composition isotopique et le potentiel hydrique des plantes. Le résultat global obtenu indique une croissance annuelle comprise entre 0,27 à 9,12 mm, un potentiel hydrique de 1 à 5 MPa et une composition isotopique de carbone comprise entre -22,22 à 26,58 ‰. La relation entre $\delta^{13}C$, la croissance radiale et le potentiel hydrique a révélé une interaction entre la disponibilité en eau, la conductance stomatique, la croissance et le $\delta^{13}C$. Deux stratégies d'utilisation d'eau ont été constatées. Les espèces avec une faible valeur moyenne de $\delta^{13}C$ (*A.senegal, A.seyal*) présentent un potentiel hydrique élevé et une meilleure croissance en saison humide. Cela indique un faible niveau d'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE) et de stratégie opportuniste d'utilisation de l'eau. Les espèces à faible potentiel hydrique (*A.tortilis*

et *B.aegyptiaca*) ont montré une meilleur croissance et une faible augmentation de $\delta^{13}C$ pendant la période de sécheresse. Ces résultats ont permis de comprendre que l'étude du $\delta^{13}C$ peut donner des informations pertinentes sur l'efficacité d'utilisation de l'eau par les plantes, et permet aussi d'identifier les espèces qui peuvent être tolérantes à la sécheresse occasionnée par des changements climatiques à venir.

2.2 Tchad : climat et végétation

Situé entre le 7^{e} et 24^{e} degré de latitude nord et le 13^{e} et 24^{e} degré de longitude est, le Tchad s'étend sur 2 000 km du Nord au Sud et sur 1 000 km d'Est à l'Ouest (figure 2.3). Sa superficie est de 1 284 000 km^{2}. Il partage ses frontières avec la Libye au Nord, la République centrafricaine au Sud, le Soudan à l'Est, le Niger, le Nigéria, et le Cameroun à l'Ouest. Le pays forme une cuvette bordée par des massifs montagneux. Il est constitué de deux grandes plaines dont l'une désertique au Nord et l'autre au Sud drainée par les deux principaux fleuves du pays, le Chari, le Logone et leurs affluents. Les plaines sont séparées par le massif central tchadien (Le Guéra).

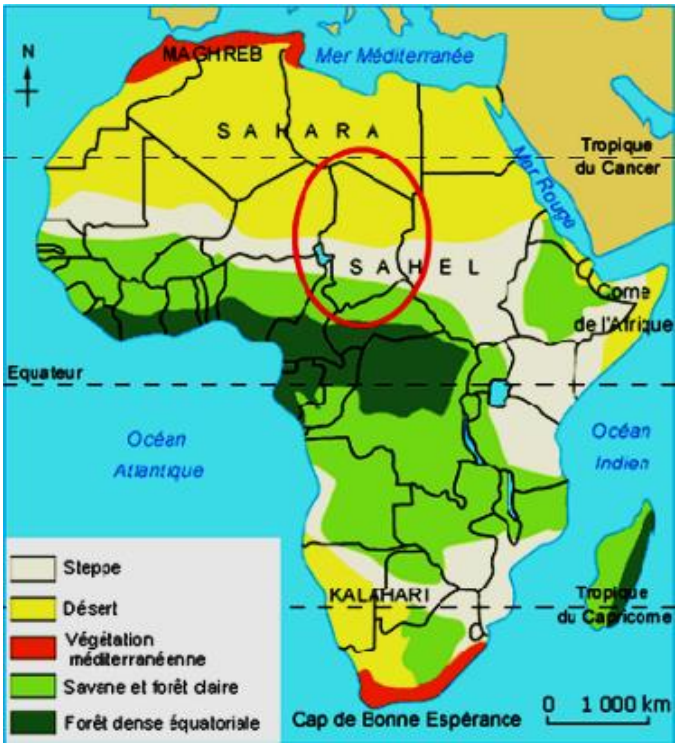


Figure 2.3. Le Tchad dans les paysages naturels d'Afrique (Aurélie, 2021)

2.2.1 Climat et variations climatiques

Le climat du Tchad est de type tropical semi-humide à désertique avec deux saisons : une saison des pluies et une saison sèche. En fonction de la répartition de la pluviométrie, on distingue trois grandes zones climatiques (Annexe 1) :

- La zone soudanienne : située au Sud, elle est la zone la plus arrosée avec une moyenne annuelle des précipitations supérieure à 800 mm. La saison de pluie est d'environ 7 mois (d'avril à novembre). La température maximale avoisine souvent 45°C en période de forte chaleur (de mars à avril).

- La zone sahélienne : comprise entre le 13^{e} et le 18^{e} parallèle Nord, elle englobe tout le centre du Tchad. La zone sahélienne est caractérisée par une pluviométrie annuelle faible allant de 200 à 600 mm et reparties sur trois mois (juin à septembre). La température peut atteindre 47 °C en période de forte chaleur (de mars à mai) avec un minima d'environ 21 °C observé entre décembre et janvier (Depierre *et al*., 1971).

- La zone saharienne : située au-dessus du 18^{e} parallèle Nord, cette zone est la moins arrosée. La pluviométrie est faible, voire inexistante certaines années, avec une moyenne annuelle des précipitations inférieure à 200 mm. Les températures sont extrêmes, elles peuvent avoisiner 50 °C en journée pendant les mois les plus chauds et baisser en dessous de 0 °C la nuit.

2.2.2 Variations climatiques au Tchad et projections à court terme

Le Tchad est un des pays de la bande sahélienne. Cette bande est considérée par les experts du GIEC (Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat) comme une des régions du globe les plus vulnérables au changement climatique (Sultan *et al.,* 2015). En effet, dès la fin du 19ème siècle, les effets du changement climatique ont commencé à se faire sentir dans ces régions, et cette tendance s'est accentuée au cours des dernières décennies. Quelques effets visibles de ce changement sont l'augmentation de la température, la variabilité des précipitations avec pour conséquence des inondations, les sécheresses successives, l'érosion des sols, la disparition de la végétation laissant place aux dunes de sable.

2.2.2.1 Evolution de la température

En 1860, la température moyenne à la surface du globe avait connu une augmentation de 0,6±0,2°C par rapport à la période préindustrielle ; cette augmentation s'est accentuée au cours du 20ème siècle pour atteindre 0,13 °C par décennie entre 1965 et 2005 (AGRHYMET, 2010). Selon le rapport de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) du 2 décembre 2020, la

température moyenne mondiale de janvier à octobre 2020 a été supérieure de 1,2 °C par rapport à sa valeur préindustrielle. Cette valeur pourrait dépasser 1,5 °C d'ici 2024. Si au niveau mondial, la température est en train d'augmenter régulièrement, cette tendance est encore plus marquée en Afrique.

En effet, selon le cinquième rapport du groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC), une grande partie de l'Afrique s'était déjà réchauffée de plus de 1°C en 1901 par rapport à sa valeur préindustrielle. Cette hausse de température s'est accentuée durant les deux dernières décennies du siècle pour atteindre une moyenne de 2 °C dans plusieurs régions d'Afrique ; cette tendance devrait se poursuivre.

Le Sahel, qui est une des régions d'Afrique les plus vulnérables aux changements climatiques, a vu sa température croître davantage que dans les autres régions. En 1950, la température moyenne avait déjà augmenté de 1,5 °C (Sultan *et al.,* 2015). Cette hausse serait actuellement de l'ordre de 3 °C (AGRHYMET, 2010 ; IPCC, 2014), et la tendance devrait se poursuivre avec une augmentation de +6 °C annoncée d'ici la fin du 21ème siècle par rapport à la valeur préindustrielle.

Au Tchad, la tendance est la même qu'au Sahel. Les indices liés à la température présentent une tendance à la hausse mais de façon moins marquée que dans d'autres pays de la bande sahélienne (IRAM, 2019). En 1950, les températures annuelles minimales avaient déjà augmenté de 0,5 à 1,7 °C suivant les stations (Green Climate Fund, 2019). De 1951 à 2010, les températures minimales auraient augmenté de 2 °C, et les maximales de 1 °C, avec des valeurs plus élevées entre 2002 et 2010 (Mbaiguedem, 2012).

Des projections d'augmentation des températures au Tchad ont été établies par l'IRAM (Institut de Recherches et d'Applications des Méthodes de développement) sur la base de l'expérience selon le modèle de recherche mondiale sur le climat. Les prévisions indiquent une augmentation de température moyenne de 1,2 °C, 2,2 °C, et 4,1 °C dans la zone saharienne et soudanienne respectivement en 2030, 2050, et 2100. La zone sahélienne sera la plus touchée par cette augmentation qui sera de l'ordre de 1,3 °C, 2,4 °C, 4,5 °C pour les horizons 2030, 2050, 2100.

2.2.2.2 Variations pluviométriques

Les précipitations au Tchad résultent de l'interaction de deux masses d'air, l'anticyclone de Sainte-Hélène communément appelé ‘‘mousson’’ qui correspond à l'air équatorial maritime humide se déplaçant du sud-ouest au nord-est, et l'Harmattan qui correspond à l'air tropical continental chaud et sec qui se déplace du nord-est au sud-ouest (Sircoulon, 1976). Une

rencontre entre les deux masses d'air forme un front inter tropical (FIT). Le front intertropical se déplace du sud-ouest au nord-est en déclenchant des précipitations. Atteignant le 20ème parallèle nord, la mousson perd son humidité et s'affaiblit. L'Harmattan devenu plus lourd repousse la mousson du nord-est vers le sud-ouest en déclenchant la sécheresse. Une fois dans sa position maritime, la mousson va reprendre son humidité et recommencer son activité.

La durée des précipitations est fonction du laps de temps séparant la montée puis la descente du FIT. Pour le Sahel, elle est comprise entre 3 et 4 mois, avec une répartition irrégulière dans le temps et dans l'espace à l'origine de catastrophes hydroclimatiques telles que des sécheresses, des fortes pluies ou des inondations.

Comme d'autres pays de la bande sahélienne, le Tchad a connu plusieurs catastrophes hydro climatiques au cours du 20ème siècle. Avant les années 70, la région a connu une succession d'années humides puis a été sévèrement affectée par deux décennies de sécheresse (1970 - 1990). Cette rupture des précipitations a été l'un des plus forts signaux climatiques jamais enregistrés depuis le début des mesures météorologiques (Sultan *et al.,* 2015). À partir des années 1990, la pluviométrie s'est globalement améliorée sans que cela soit un réel retour à la normale, car cette amélioration est davantage liée à l'intensité des orages qu'à leur fréquence.

Les projections des variations pluviométriques aux horizons 2030, 2050 et 2100 présentées ne prévoient pas ou peu de changement dans les cumuls de précipitations dans la zone soudanienne (IRAM, 2019). Pour la zone sahélienne, il est annoncé une forte diminution pluviométrique comme dans la partie sud de la zone saharienne. Cette diminution est estimée à -20% en 2030 et pourrait atteindre -70% en 2100 par rapport à la moyenne 2000-2009 (IRAM, 2019). Selon les projections, le nord de la zone saharienne pourrait au contraire connaitre une augmentation de la pluviométrie (MHUR, 2012).

Il est à noter toutefois que les prévisions sur les précipitations sont contradictoires selon les documents. Certaines modélisations prévoient au contraire une forte augmentation de la pluviométrie dans la région sahélienne (IRAM, 2019).

2.2.3 Végétation du Tchad

La répartition de la végétation au Tchad obéit à la même règle que celle du climat. Chaque zone climatique est associée à un type donné de végétation. Au sud, dans la zone soudanienne, nous avons la savane boisée et arborée. Au centre du Tchad, dans la zone sahélienne, c'est le domaine de la steppe. Plus au nord, dans la zone saharienne, la végétation est rare et clairsemée. On

rencontre dans cette région des tapis graminéens présents par touffes, souvent déchaussées, et les Palmiers doum dans les Oued ou Wadi (Oasis).

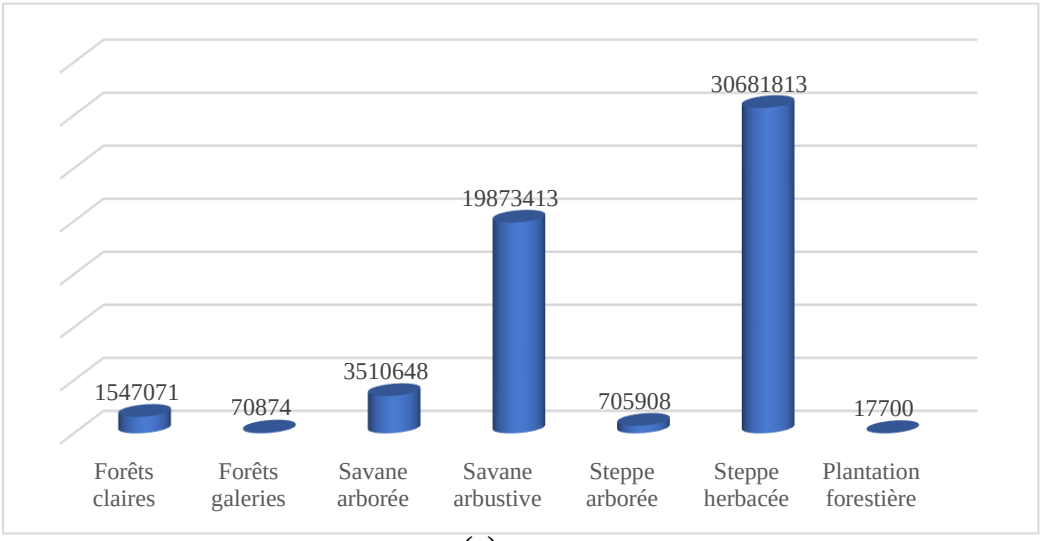
Le tableau 2.1 ci-dessous présente la répartition des principales espèces d'arbres en fonction des zones climatiques. Il a été établi par la FAO dans son rapport d'évaluation des ressources forestières mondiales de 2005.

Tableau 2.1. Répartition de la végétation en fonction du domaine bioclimatique (FAO, 2005)

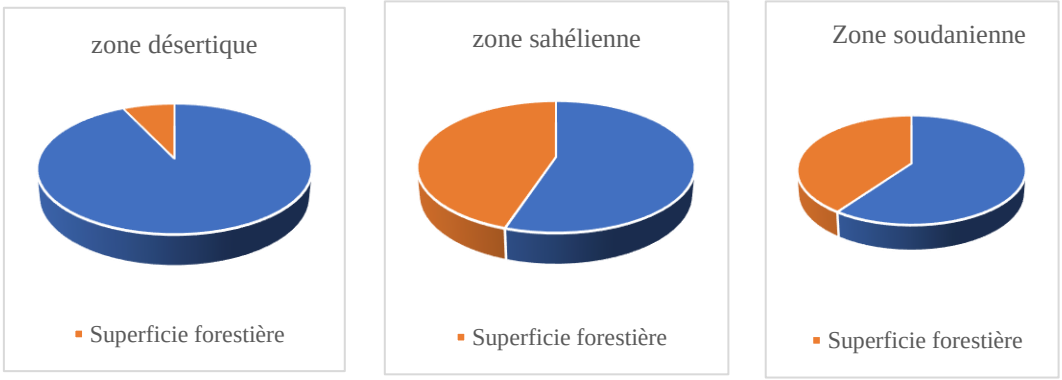
Domaines bioclimatiques	Paysage	Principales espèces
1) Zone saharienne **(moins de 200 mm de pluie)**	Pseudo steppes, espaces nus	Herbacées : *Passicum turgium, Aristida spp, Chlorophora senegalensis.* Espèces ligneuses rares : *Oracurus crassifolia, Capparis décidua, Acacia raddiana, Balanites aegyptiaca, Commiphora africana.*
2) Zone sahélienne **Secteur sahélo** **(200 à 400 mm de pluie)**	Steppes arbustives dominées par des épineux à minosoïdes	Ligneux : *Acacia senegal, Acacia nilotica, Acacia seyal, Hyphaene thebaica, Gueria senegalensis, Bauhinia rufescens, Ziziphus mauritiana.* Herbacées : Andropogons.
Secteur sahélo-soudanien (400 à 600 mm de pluie)	Steppes arbustives et/ou arborées à épineux (savane arbustive)	*Acacia senegal, Acacia nilotica, Balanites aegyptiaca, Acacia melifera, Combretum spp, Anogeissus leocarpus, Sclerocarya birrea, Terminalia macroptera, Faidherbia albida, Guiera senegalensis, Boscia senegalensis, Ziziphus mauritiana.*
3) Zone soudanienne **(600 à 900 mm de pluie)**	Savane arborée	*Anogeissus leocarpus, Terminalia macroptera, Faidherbia albida, Combretum glutinosum, Cadaba farinosa, Bauhinia rufescens, Ziziphus spp, Acacia spp, Detarium macrocarpum, Khaya senegalensis, Celtis integrifolia, Cassia sieberiana, Albizia chevalieri*
4) Secteur soudano-guinéen (900 à 1 200 mm)	Savane boisée, forêts claires	*Faidherbia albida, Borassus aethiopum, Hyphaene thebaica, Isoberlinia doka, Prosopis africana, Daniella oliveri, Parkia biglobosa, Vitellaria paradoxa.*
5) Secteur guinéen (plus de 1 200 mm)	Forêts plus ou moins denses et galeries forestières	*Isoberlinia doka ou Vitellaria paradoxa, Khaya senegalensis, Prosopis africana, Anogeissus leocarpus, Diospyros mespeliformis* et aussi espèces ripicoles comme *Vitex spp.*

2.2.4 Les ressources forestières du Tchad

La superficie forestière du Tchad n'est pas connue avec précision faute d'inventaire forestier national. Elle a été estimée en 2013 à 58 326 365 ha repartis entre les forêts claires (1 547 071 ha), les forêts galeries (70 874 ha), la savane arboré (3 510 648 ha), la savane arbustive (19 873 413 ha), la steppe arborée (705 908 ha), la steppe herbacée et arbustive (30 681 813 ha), et les plantations forestières (17 700 ha) (FAO, 2015). La répartition suivant les zones climatiques se présente comme suit (figure 2.4a et 2.4b) : zone désertique 4 599 308 ha sur une superficie de 600 370 km^2 ; zone sahélienne 45 042 480 ha sur une superficie de 553 590 km^2 ; zone soudanienne 8 684 577 ha sur une superficie de 130 040 km^2.



(a)



(b)

Figure 2.4. (a) ressources forestières du Tchad ; (b) superficie forestière selon les zones climatiques (FAO, 2015).

La superficie annuelle moyenne de reboisement est constante depuis 1990 : environ 300 ha/an (Direction des forêts).

Le taux de dégradation forestière entre 1990 et 2000 a été estimé par la FAO à 0,6 % par an, soit une perte moyenne annuelle de superficies forestières comprise entre 140 000 et 200 000 hectares. En 2013, le SIDRAT avait estimé le taux de déforestation à 2,5 %/ha/an. En raison du manque de nouvelles données, ce taux a été utilisé pour actualiser la superficie forestière de 2015 à 2020.

Le volume brut sur écorce du matériel végétal sur pied est estimé à 18,3 m^3/ha en 2020 (FAO, 2015). La quantité de biomasse forestière aérienne et souterraine est respectivement estimée à 91,2 tonnes/ha et 25,5 tonnes/ha. Il faut noter que depuis 2008, la coupe des arbres et l'exploitation forestière sont interdites au Tchad sauf pour des études scientifiques qui nécessitent cependant une autorisation spéciale de la direction des forêts.

2.3 Etat des connaissances sur *Faidherbia albida* et *Balanites aegytiaca*

2.3.1 *Faidherbia albida*

Faidherbia albida (Del) A. Chev. (syn. *Acacia albida*) appartient à la famille des Fabaceae, sous famille des Mimosaceae. C'est un arbre aux rameaux épineux dont la hauteur peut atteindre 30 m, et le tronc un diamètre maximum d'environ 1,5 m (CTFT, 1988). Son écorce de couleur brune à grise mate ou blanche est lisse pour les jeunes plantes, elle devient écailleuse pour les individus adultes. La particularité de cet arbre est sa phénologie inversée : il perd ses feuilles en début de saison des pluies (2.5a) et les porte en saison sèche (2.5b).

(a) (b)

Figure 2.5. *Faidherbia albida* : (a) physionomie de la plante en saison des pluies
(b) physionomie de la plante au début de la saison sèche

2.3.1.1 Ecologie et distribution

Faidherbia albida est une espèce inféodée à toutes les zones sèches d'Afrique, du Moyen-Orient, et d'autres régions d'Asie où elle a été introduite. Son aire principale de répartition est l'Afrique (Figure 2.6) où elle est présente dans presque toutes les régions (CTFT, 1988), de part et d'autre des deux tropiques nord et sud.

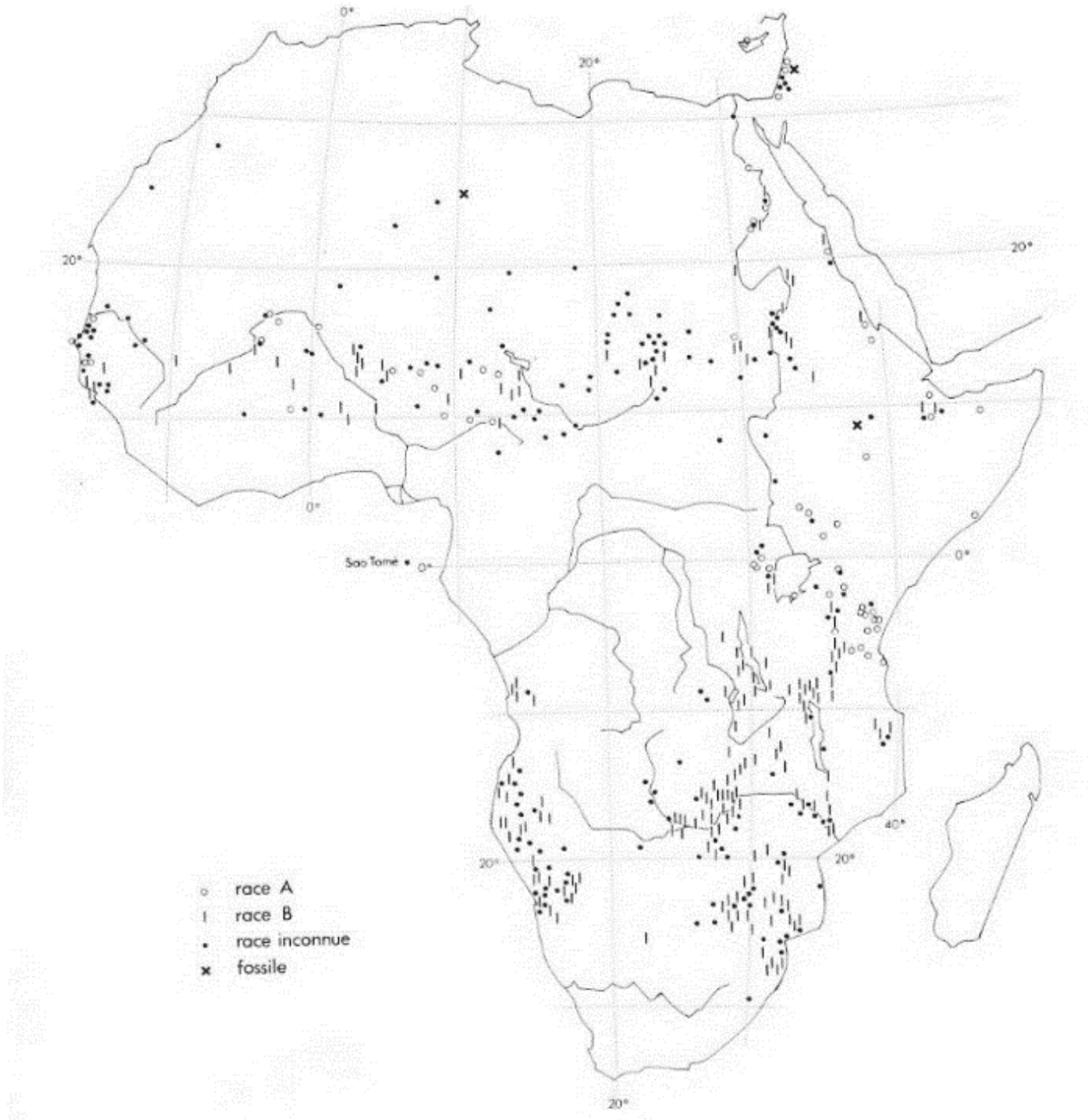


Figure 2.6. Carte de répartition de *Faidherbia albida* en Afrique (CTFT, 1988)

2.3.1.2 Caractères *botaniques*

Faidherbia albida est une légumineuse qui se caractérise par des inflorescences en épis qui apparaissent deux mois environ après la feuillaison (Figure 2.7). Les feuilles sont bipennées avec des épines à la base. Chaque penne est composée d'un rachis de 2,5 à 5,5 cm de long et de 6 à 23 paires de folioles.

Les fruits de couleur orange vif à brun-rouge (Figure 2.7) sont des gousses indéhiscentes. Les gousses renferment des graines séparées les unes des autres par des cloisons épaisses. Elles sont utilisées comme aliment pour le bétail.

Brenan (1959) a signalé en Afrique orientale la présence de deux races de *Faidherbia albida* qui n'ont jamais fait l'objet d'une taxonomie car les caractères qui les définissent ne sont pas corrélatifs et apparaissent plutôt comme des tendances hétérogènes (Ross, 1966).

Figure 2.7. Feuilles, fleurs et fruits de *Faidherbia albida*

2.3.1.3 Croissance de la plante

La croissance de *Faidherbia albida* est liée à son environnement écologique (CTFT, 1989). Cette espèce est une phréatophyte (Mignon et Do, 1999 ; Roupsard *et al*., 1999) car dès sa germination, la plante développe rapidement son pivot pour rechercher la nappe phréatique afin d'assurer ses besoins en eau. Une étude réalisée par le CTFT (1988) indique qu'au bout de 60 jours sur un terrain sableux, la tige de *Faidherbia albida* mesure 15 cm de hauteur avec un pivot de 60 cm. A 90 jours, le pivot mesure presque 90 cm et la tige 32 cm.

L'étude réalisée dans le cadre du projet CARE en 1975 au Tchad (CTFT, 1989) montre que la croissance initiale des plantes est irrégulière car elle est liée à l'environnement écologique. Lors de conditions favorables à très favorables, la croissance annuelle était de 1 à 1,5 m de hauteur.

Pour des conditions moyennes, la croissance annuelle en hauteur est comprise entre 0,5 et 0,7 m.

2.3.1.4 Sylviculture

La sylviculture du *Faidherbia albida* a fait l'objet de recherches approfondies du CTFT à travers des programmes de régénération de l'écosystème forestier dans plusieurs pays du sahel.

La première technique de reproduction utilisée fut celle par semi direct. Cette technique a fait l'objet de nombreux essais, mais elle s'est avérée infructueuse dans toutes les régions où elle a été expérimentée (Tchad, Niger, Sénégal…) ce qui a conduit à son abandon (CTFT, 1989). Après cet échec, plusieurs autres méthodes ont été expérimentées (graines pré-germées, drageon, bouturage horticole…). A l'issue d'expérimentations de différents types, la méthode qui consiste à faire pousser les plantes dans des sachets de polyéthylène remplis d'un mélange de sable et d'humus avant de les planter, a donné les meilleurs résultats. Pour une bonne germination des graines, trois méthodes sont utilisées : (1) scarification mécanique des téguments ; (2) immersion des graines dans l'eau bouillante puis refroidissement pendant 24 heures ; (3) immersion pendant 5 minutes dans de l'acide sulfurique concentré à 98 %, puis rinçage et trempage dans l'eau pendant 24 heures.

2.3.1.5 Structure anatomique du bois

La structure anatomique du bois de *Faidherbia albida* (figure 2.8) a été étudiée par Fahn (1986) et Moussa (2020). Ses caractéristiques sont les suivantes : le bois est de couleur beige jaunâtre, parfois sombre au cœur pour certains vieux arbres, son grain est grossier et il présente toujours un contrefil irrégulier. L'aubier et le duramen sont indifférenciés. Les limites des cernes de croissance sont distinctes ou indistinctes, caractérisées par une alternance de bandes de fibres et de parenchyme. Les vaisseaux sont moyens à très gros, ils sont plus petits dans les bois des branches. Les fibres sont larges de 20 à 25 µm et de longueur comprise entre 0,8 et 1,5 mm. Les parenchymes ont une structure étagée, en bande large, un peu sinueuse, reliant les pores. Les pores sont de taille variable, disséminés, isolés ou accordés radialement par 2 ou 3, à raison de 2 à 5 par mm^2 (ci-dessous coupe transversale du bois de *Faidherbia albida*, ©Patrick Langbour).

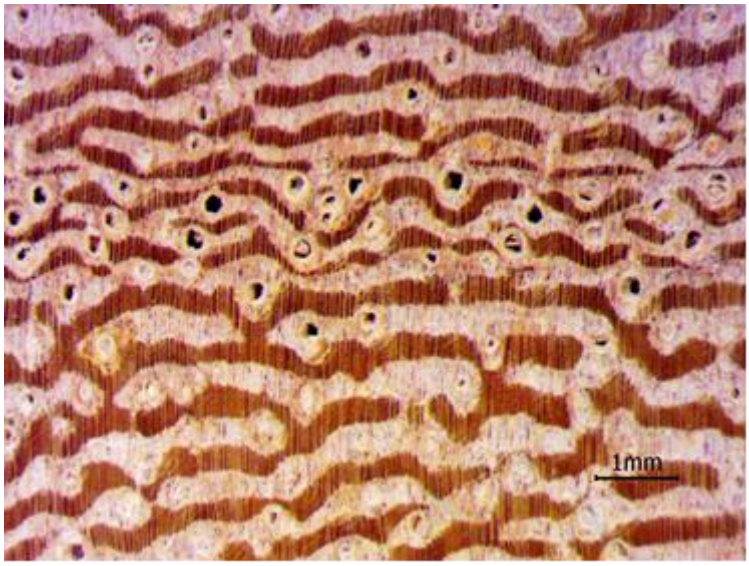


Figure 2.8. Structure anatomique de *Faidherbia albida* (©Patrick Langbour)

2.3.1.6 Caractéristiques technologiques du bois et usages

Léger à mi-lourd, peu durable, le bois de *Faidherbia albida* a été très peu étudié bien qu'il soit utilisé comme bois d'œuvre dans sa zone naturelle de répartition. Il est notamment utilisé pour la fabrication d'objets d'art (sculpture) (figure 2.9), d'ustensiles de cuisine (pilon, mortier, calebasse…), dans la construction de cases et de greniers. Il constitue également un excellent combustible avec un pouvoir calorifique supérieure de 4 720 kcal/kg (CTFT, 1988 ; Le Floc'h et Aronson, 2013). La seule étude complète disponible portant sur les propriétés technologiques de son bois est celle du Centre technique forestier tropical (CTFT, 1988). Elle a été réalisée sur deux billes récoltées dans la région de Diourbel au Sénégal. Les résultats sont présentés dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2. Caractéristiques physiques et mécaniques du bois de *Faidherbia albida* de la région de Diourbel (CTFT, 1989)

	Moyenne bille 1	**Moyenne bille 2**
Propriétés physiques		
Dureté (N)	3,5	5,2
Densité*	0,58	0,71
Taux d'humidité (%)	10,27	9,8
Point de saturation des fibres (%)	22	24
Retrait volumique total (%)	12,4	13,8
Coefficient de retrait volumique (%/%)	0,56	0,58
Retrait tangentiel total (%)	8,6	8,4
Retrait radial total (%)	3,7	4,6
Propriétés mécaniques		
Contrainte de rupture en compression * (MPa)	39,4	51,4
Contrainte de rupture en flexion statique * (MPa)	105,1	95,6
Module d'élasticité longitudinal (flexion 3 points) * (MPa)	9 022	8 237

*** : caractéristique déterminée sur des bois stabilisés à 12 % d'humidité**

(a) (b)

Figure 2.9. Articles en bois de *Faidherbia albida* : (a) pirogue ; (b) sculpture de dromadaire

2.3.2 *Balanites aegyptiaca*

Balanites aegyptiaca ou ‘‘Dattier du désert’’ (Figure 2.10) est un arbre épineux de la famille des zygophyllacées. On le rencontre sous différentes conditions climatiques, en particulier dans les régions arides avec des températures très élevées et une faible pluviométrie (Kant et Gour, 2012 ; Elfeel, 2004). L’arbre peut atteindre 17 m de haut. Le tronc peut atteindre 60 cm de diamètre ; il est souvent cannelé ; son écorce est crevassée (Hall, 1992 ; Hall, 2004).

Figure 2.10. *Balanites aegyptiaca*

2.3.2.1 Ecologie et distribution naturelle

Balanite aegyptiaca est une espèce du domaine soudano-sahélien. Selon Parkan (1993), l’arbre est très peu exigeant en eau et se développe sur la plupart des types de sol (sableux, argileux, argilo-limoneux, pierreux) grâce à son système racinaire très développé. Il se rencontre dans presque toutes les régions arides d’Afrique (figure 2.11), dans la péninsule arabique et dans le Nord-Ouest de l’Inde (Le Floc'h et Aronson, 2013).

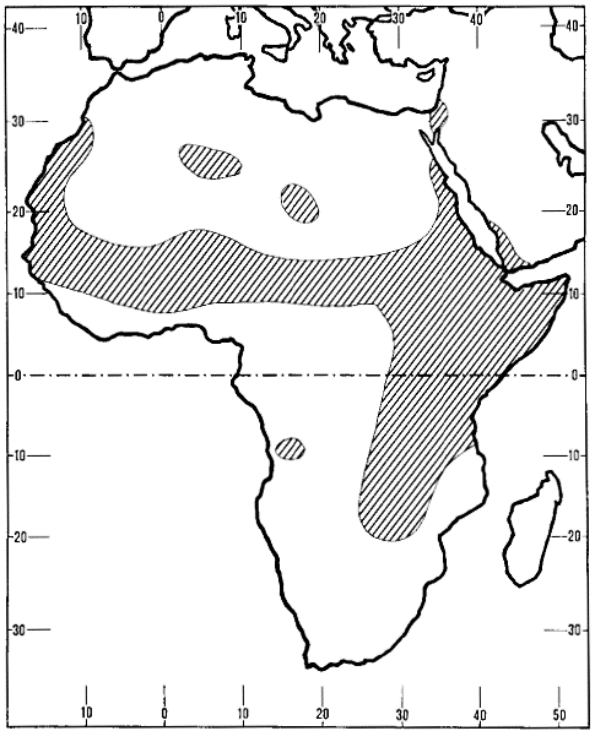


Figure 2.11. Zone de distribution du *Balanites aegyptiaca* (Hall, 2004)

2.3.2.2 Caractère botanique

Balanite aegyptiaca est un arbre dont les branches ont des extrémités retombantes. Ces branches sont armées de longues et dures épines droites et non ramifiées, disposées en spirale, mesurant 2 à 8 cm de long et 2 à 6 mm de diamètre à la base (Arbonnier, 2002). Les jeunes plantes ont un tronc lisse qui avec l'âge devient gris, fissuré (figure 2.21 a) et crevassé (Hall, 2004). Ses feuilles de couleur verte sont courtement pétiolées, bifoliées. Les folioles sont ovales à elliptiques. Les fleurs sont jaunes verdâtres composées de 5 pétales et 5 sépales. Les fruits sont des drupes, brun verdâtre à jaune à maturité (figure 2.12 b). Ils sont cueillis et sucés comme des bonbons pour aspirer la pulpe. Après la consommation du fruit, on extrait l'amande contenue dans une coque ; cette amande est riche en huile. L'huile extraite des amandes présente des propriétés exceptionnelles ; elle est utilisée pour des multiples applications (culinaire, médicinale…).

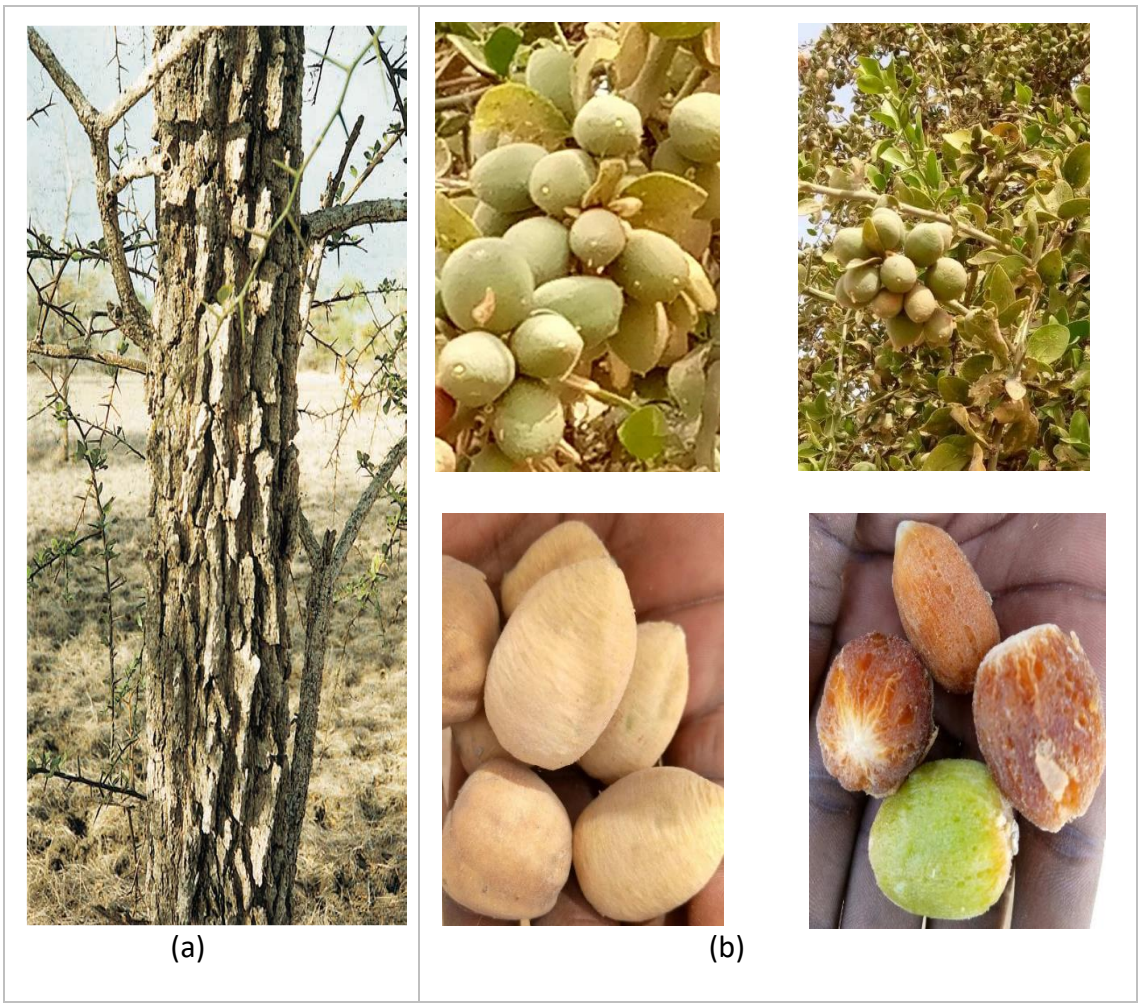


Figure 2.12. *Balanites aegyptiaca* : (a) tronc ; (b) feuilles et fruits

2.3.2.3 Croissance de *Balanites aegyptiaca*

La croissance du *Balanites aegyptiaca* a notamment été étudiée par Habou *et al.* (2019) au Centre Régional de Recherche Agronomique (CERRA) de Zinder (centre-sud du Niger). Les travaux ont porté sur la germination et l'évolution des plantules de cette espèce. Des essais de germination ont été effectués dans des planches rectangulaires sur six types de traitements pendant 3 mois et le suivi de croissance des plantules dans des pots en plastique enfouis dans le sol pendant 6 mois. L'étude a montré que l'ingestion des fruits de *Balanites aegyptiaca* par les chèvres réduit significativement la dormance tégumentaire. Les graines extraites des noyaux qui ont transité par le tractus digestif des chèvres ont le taux de germination le plus élevé (76,87%) alors que le taux de germination le plus faible a été obtenu avec les fruits entiers (38,12%). Après 6 mois de suivi, la croissance du pivot racinaire des plantules (78,69 ± 9 cm)

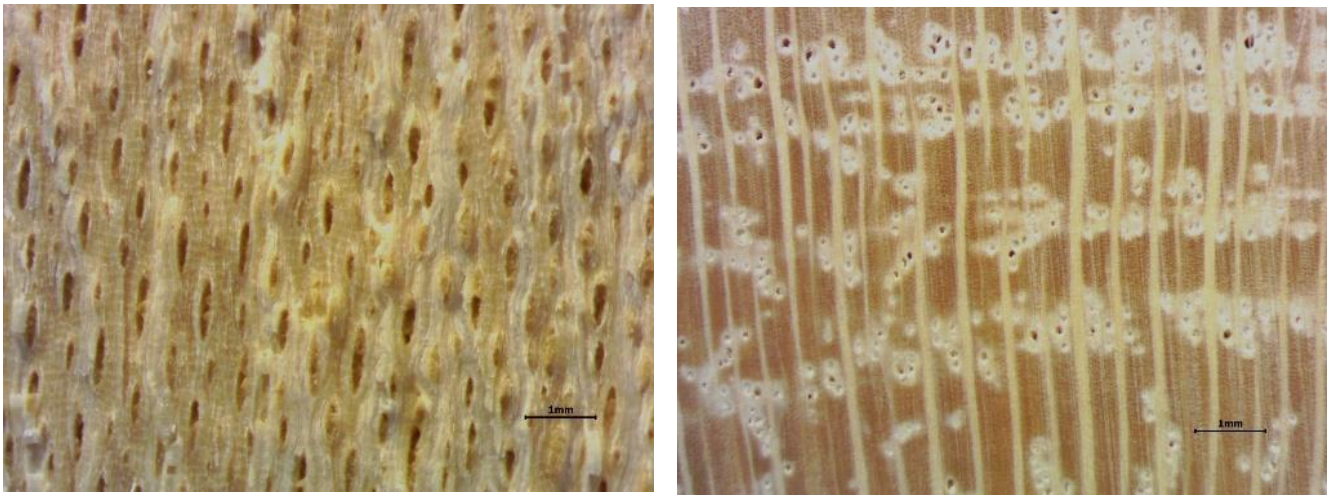
est plus importante que celle de la partie aérienne (61,8 ± 6,2 cm). Les résultats de cette étude ont conduit à envisager la production de plants de *Balanites aegyptiaca* en vue de sa conservation durable.

2.3.2.4 Sylviculture de *Balanites aegyptiaca*

B. aegyptiaca n'est pas couramment cultivé (Okia, 2010). De petites plantations sont mises en place au Niger, au Tchad, dans le nord du Nigéria, en Égypte et en Israël (Hall et Walker, 1991). Cette espèce se multiplie principalement à partir de graines en semis direct ou par production de semis en pépinière. Elle se régénère aussi naturellement, par drageonnement des racines et taillis (Von Maydell, 1986 ; Hall et Walker, 1991).

2.3.2.5 Structure anatomique du bois de *Balanites aegyptiaca*

Le bois du *Balanites aegyptiaca* est à pores diffus. Il est de couleur jaune et son aubier est indifférencié. Le fil du bois est légèrement ondulé. Les limites des cernes de croissance sont indistinctes avec une fréquence des vaisseaux variable qui ne constituent pas les limites des cernes. Les vaisseaux sont moyens à gros, peu nombreux et généralement isolés. Les rayons ligneux sont bien visibles, de 120 à 130 microns de large et 1 à 2 mm de hauteur, soit un rapport moyen largeur / hauteur égal à 0,09 (Figure 2.13 a et b).



(a) (b)

Figure 2.13. (a) Rayons ligneux en coupe tangentielle ; (b) Rayons ligneux en coupe transversale (©Patrick Langbour)

2.3.2.6 Caractéristiques technologiques du bois et usages

De couleur jaune pâle, le bois de *Balanites eagyptiaca* est très utilisé et apprécié localement du fait de ses propriétés mécaniques, de son haut pouvoir calorifique et de sa bonne résistance aux insectes (Creac'h, 1940 ; Hall, 2004 ; Le Floc'h et Aronson, 2013). Il est surtout utilisé en construction, pour la fabrication d'outils agricoles (manche de houe, hache…), d'ustensiles de cuisines (mortier, pilon, planche à découper…), de tablettes pour l'écriture des versets coraniques, et comme source d'énergie (Figure 2.14).

Ses propriétés technologiques (tableau II) ont été étudiées par Mohamed (2019) sur des échantillons prélevés au Soudan dans la région de Darfour. Weber et Montes (2010) ont étudié la relation entre la croissance et la masse volumique de son bois sur des spécimens prélevés dans 11 localités du Niger, la masse volumique moyenne obtenue pour cette étude était de 627 kg/m^3.

Tableau II. Caractéristiques physiques et mécaniques du bois du *Balanites aegyptiaca* de la région du Darfour (Mohamed, 2009)

Caractéristique	Moyenne
Retrait radial total (%)	5,6
Retrait tangentiel total (%)	11,5
Masse volumique (kg/m^3)	780
Module d'élasticité longitudinal (MPa)	8 813
Contrainte de rupture en compression parallèle (MPa)	47,5
Contrainte de rupture en flexion statique (MPa)	107,1

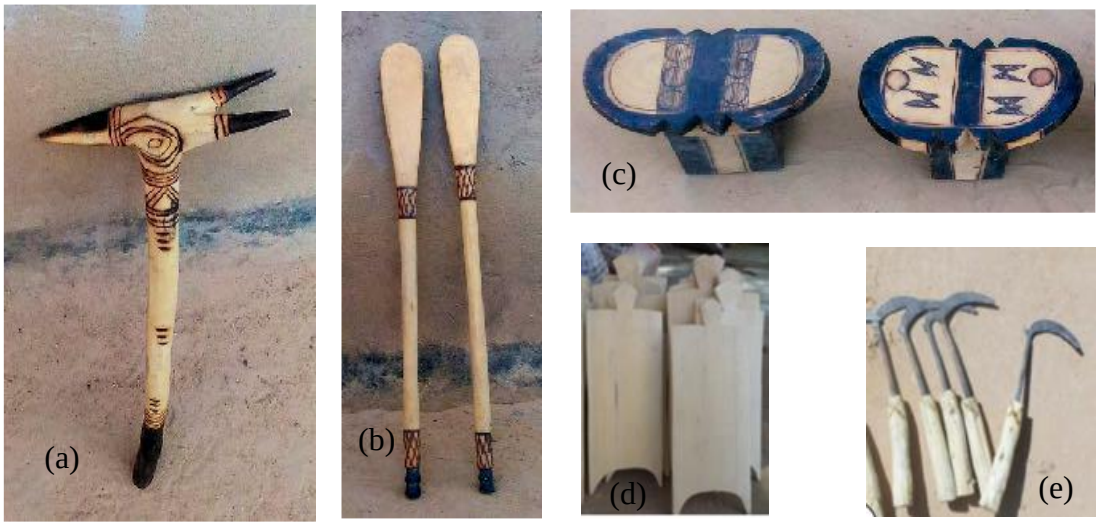


Figure 2.14. Quelques articles en bois de *Balanites aegyptiaca* : (a) objet d'art ; (b) spatule ; (c) banc ; (d) ardoises coraniques ; (f) manche de faucille

2.4 Conclusion de l'état de l'art, objectifs et axes de recherche retenus

Ce chapitre nous a permis de faire un état des lieux des principaux travaux afférents à la thématique de recherche abordée et nous ont permis de mieux cerner notre sujet de recherche. Ces travaux montrent notamment que la croissance de l'arbre dépend de plusieurs facteurs internes (génétique et ontogénique) et externes (climatique, édaphique et sylvicole). Ces facteurs sont à l'origine de la diversité et de l'hétérogénéité des caractéristiques du bois. Les résultats des recherches déjà conduites sur les deux espèces étudiées, *Faidherbia albida* et *Balanites aegyptiaca*, espèces emblématiques du Tchad, ont montré que les conditions de croissance impactent fortement le comportement de la plante. En effet, la température et pluviométrie jouent un rôle important dans la croissance de l'arbre ce qui influe directement sur la qualité du bois et sur ses caractéristiques. Il faut rappeler que la notion de qualité du bois est fonction de l'adéquation entre ses propriétés et les usages envisagés. Les bois de ces deux essences sont très utilisés et appréciés au niveau local, mais leurs propriétés n'ont fait l'objet que de très peu d'études. Compte tenu de l'intérêt que présente ces deux arbres dans leur aire naturelle de répartition, et de leur capacité à résister à la sécheresse, il est apparu important de mieux comprendre comment pouvaient varier les propriétés de ces bois en fonction des conditions climatiques et de leurs variations.

Pour répondre à cette question, deux axes de recherche ont été définis pour les deux essences étudiées :

1. Etude des propriétés physiques (masse volumique, infradensité, retraits de séchage, point de saturation de fibres, angle des microfibrilles), des propriétés mécaniques (module d'élasticité longitudinal, contraintes de rupture en flexion statique et en compression longitudinale), et des constituants chimiques (extractibles, lignine, cellulose et hémicelluloses) du bois. Des mesures d'angle de microfibrilles ont dans un second temps été réalisées sur un nombre limité d'échantillons pour essayer d'expliquer certaines tendances de variation des retraits de séchage.

2. Etude dendrochronologique (estimation de l'âge, mesure de la largeur et de la densité du bois des cernes), micromécanique (module d'élasticité et contrainte de rupture en flexion à l'échelle du cerne) et dendro-isotopique (détermination des rapports isotopiques de carbone).

Des collaborations ont été engagées avec plusieurs laboratoires pour réaliser certains de ces essais et mesures spécifiques :

* UMR Silva (Nancy) : étude microdensitométrique

* UMR PIAF (Clermont-Ferrand) : essais de micromécanique

* Institut Européen des Membranes (Montpellier) : mesure d'angles des microfibrilles

* ISEM (Montpellier) : détermination des rapports isotopiques

* LERMAB (Nancy) : analyse GCMS.

De plus, du matériel d'étude complémentaire provenant du Sénégal a été mis à disposition par :

* Le *Earth and Life Institute* de l'Université catholique de Louvain (Belgique) : *Balanites aegyptiaca*

* L'UMR Eco&Sols du CIRAD : *Faidherbia albida*.

3 Matériel et méthodes

3.1 Présentation des zones d'étude

3.1.1 Domaine sahélien tchadien : N'Djamena (Tchad)

N'Djamena (coordonnées GPS : 15,05027 longitude Est, 12,11915 latitude Nord) est une localité située en zone climatique sahélienne. Elle est caractérisée par une pluviométrie annuelle faible (moyenne annuelle pluviométrique de 566 ± 121 mm entre 1984 et 2018) réparties sur trois mois (juin-septembre). La température peut atteindre 47 °C en période de forte chaleur (de mars à mai) avec un minima d'environ 21° observé entre décembre et janvier. La végétation est de type steppique formée d'arbustes et d'épineux. Les figures 3.1 et 3.2 ci-dessous présentent le diagramme ombrothermique et l'évolution de pluviométrie sur la période 1984 – 2016. Les données ont été fournies par l'agence nationale de météorologie du Tchad (ANAM).

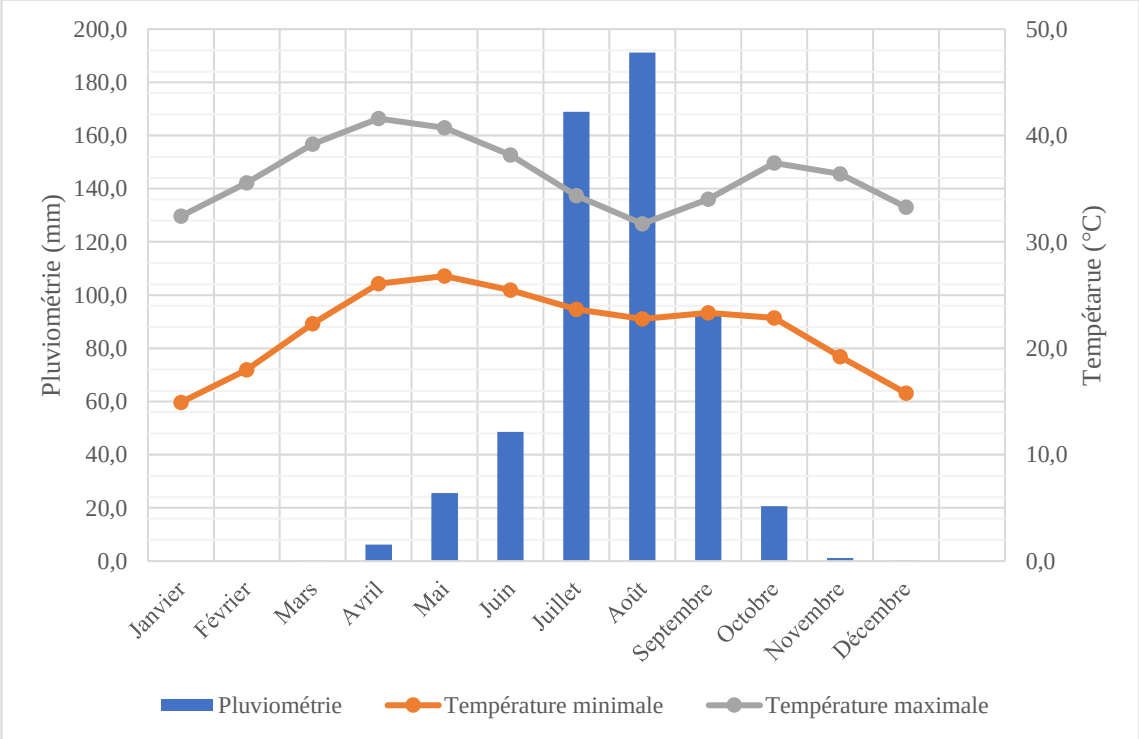


Figure 3.1. Diagramme ombrothermique de la région de N'Djamena.

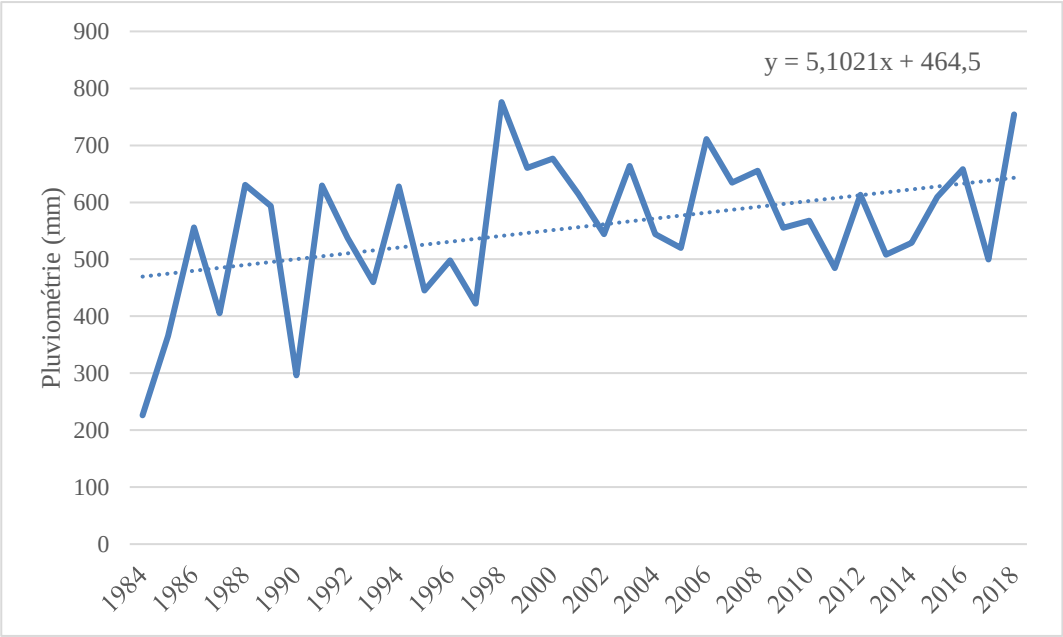


Figure 3.2. Moyenne annuelle pluviométrique de 1984 - 2018 dans la région de N'Djamena

3.1.2 Domaine soudanien tchadien : Léré (Tchad)

Léré est une commune du sud-ouest du Tchad, dans la région du Mayo-Kebbi Ouest ; elle a pour coordonnées GPS 14,22511 de longitude Est, et 9,65873 de latitude Nord. C'est une région du domaine climatique soudanien caractérisée par une pluviométrique moyenne. La moyenne pluviométrique annuelle enregistrée entre 1984 – 2018 était de 860 ± 144 mm. La saison de pluie est d'environ 7 mois (avril-octobre). La température moyenne mensuelle est comprise entre 25 et 35 °C (période 1984 – 2015) avec un minimum observé entre décembre et janvier et un maximum de mars à avril. La végétation dans cette région est formée de forêts claires et de savanes boisées. Les figure 3.3 et 3.4 ci-après présentent le diagramme ombrothermique et l'évolution de pluviométrie sur la période 1984 – 2016. Les données ont été fournies par l'agence nationale de météorologie du Tchad (ANAM).

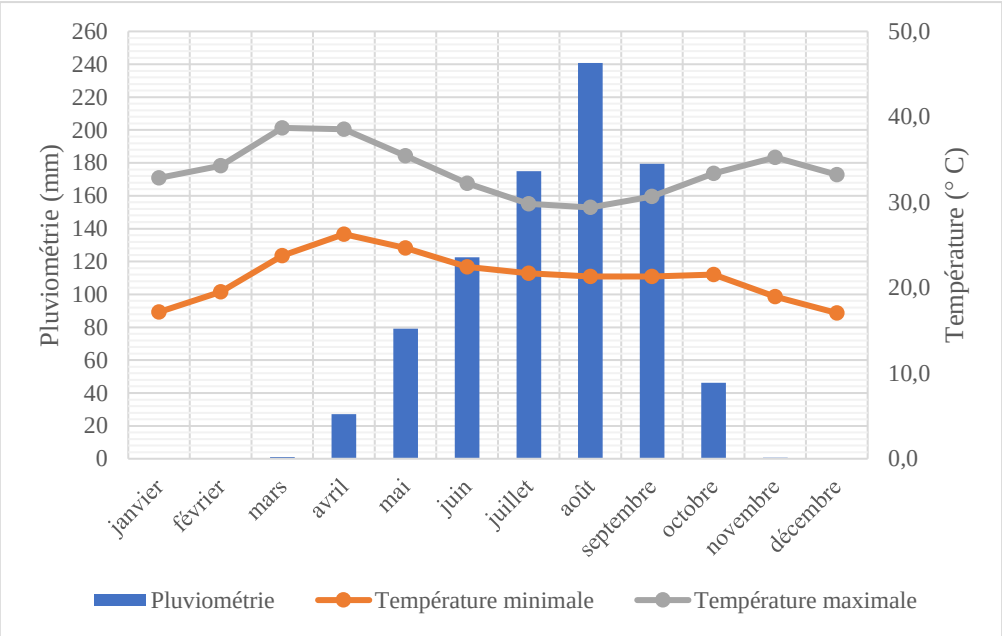


Figure 3.3. Diagramme ombrothermique de la région de Léré

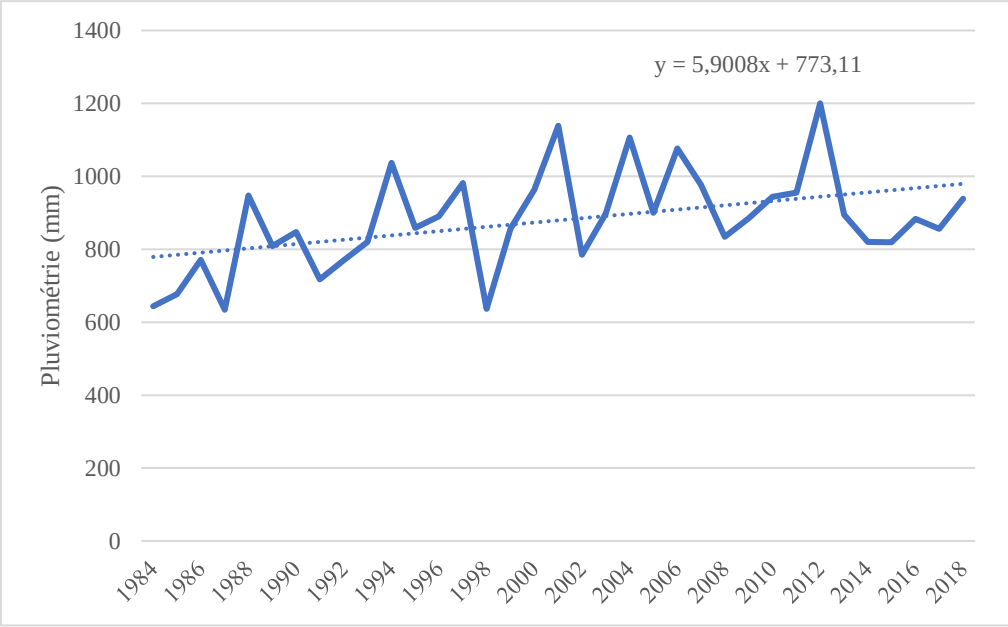


Figure 3.4. Moyenne annuelle pluviométrique de 1984 – 2018 dans la région de Léré

La tendance observée pour les relevées pluviométriques sur les deux régions est identique à celle mentionnée dans l'étude de Sultan *et al*., (2015). L'auteur a indiqué une hausse de cumul pluviométrique dans le Sahel après les deux décennies de sécheresse (1970 - 1980).

3.1.3 Domaine sahélien sénégalais : Diourbel et Widou Thiengoly (Sénégal)

Diourbel et Widou Tchiengoly sont deux villages du domaine climatique sahélien Sénégalais. Ils ont respectivement pour coordonnées GPS -15,34418 longitude Est et 15,24013 latitude Nord pour Diourbel, et -16,05117 longitude Est et 14,70438 latitude Nord pour Widou Thiengoly (Louga). Comme pour la zone sahélienne tchadienne, le climat dans ces deux régions est semi-aride, avec une longue saison sèche. La température maximale peut atteindre 45°C. La végétation est constituée d'arbres de petite taille et d'épineux.

3.2 Echantillonnage

Notre étude a été réalisée sur les bois de *Faidherbia albida* et *Balanites aegyptiaca* prélevés dans la zone sahélienne et soudanienne tchadienne, à N'Djamena, et à Léré dans la région du Mayo-Kebbi Ouest (figure 3.5). Compte tenu du nombre limité d'arbres qu'il a été possible de prélever au Tchad du fait de contraintes administratives et logistiques (coupes de bois très réglementées et nécessitant des autorisations spéciales obtenues à l'issue d'une procédure lourde), nous avons eu l'opportunité de pouvoir travailler sur des échantillons complémentaires en provenance du Sénégal en zone climatique sahélienne :

* *Balanites aegyptiaca :* échantillons fournis par le *Earth and Life Institute* de l'Université de catholique de Louvain, et prélevés dans la région de Ferlo, à proximité du village Widou Thiengoly.

* *Faidherbia albida* : échantillons fournis par l'UMR Eco&Sols du CIRAD basée au Sénégal, et prélevés dans le même village que *Balanites aegyptiaca* (Widou Thiengoly).

* Un bloc de *Faidherbia albida* conservé par le Cirad et issu d'un échantillonnage prélevé dans la région de Diourbel (Sénégal) par le Centre Technique Forestier Tropical pour une étude de caractérisation conduite sur cette essence en 1979 (CTFT, 1989).

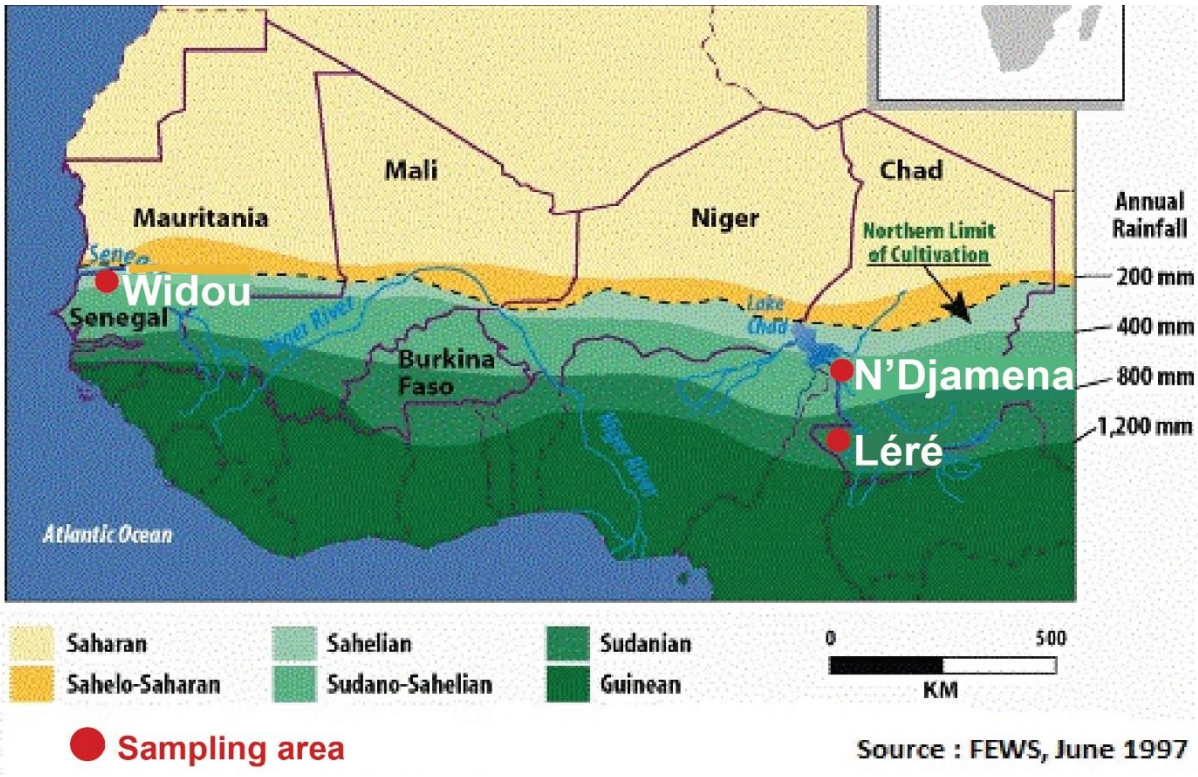


Figure 3.5. Les zones d'études

Le matériel végétal est constitué de 31 arbres dont trois *Faidherbia albida* et quatre *Balanites aegyptiaca* par provenance sahélienne (N'Djamena) et soudanienne tchadienne (Léré), six *Balanites aegyptiaca* et 11 *Faidherbia albida* en provenance de la zone sahélienne Sénégalaise (Widou et Diourbel).

L'échantillonnage a été réalisé en tenant compte de l'état sanitaire des arbres (arbres apparaissant bien portant avec un port droit) et de leurs caractéristiques dendrométriques : hauteur totale et circonférence du tronc (tableau 3.1) pour les bois du Tchad et *Balanites aegyptiaca* du Sénégal. Ces données ne sont pas disponibles pour *Faidherbia albida* du Sénégal.

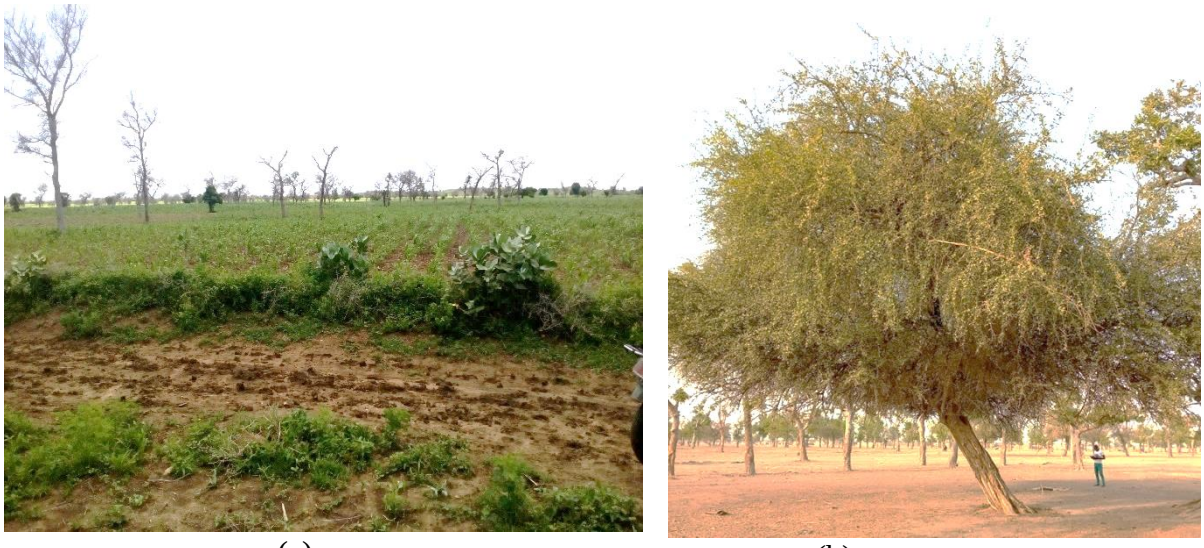
Tableau 3.1. Données dendrométriques pour les deux espèces prélevées au Tchad et pour *Balanites aegyptiaca* du Sénégal

Provenance	N° pied	Espèce	Longitude (degrés décimaux)	Latitude (degrés décimaux)	Hauteur totale du tronc (cm)	Diamètre D à h = 1 m (cm)	Elancement du tronc (H/D)
Tchad zone sahélienne	1	*B. aegyptiaca*	15,11338	12,05515	162	20,6	7,9
	2	*B. aegyptiaca*	15,11248	12,05421	187	24,3	7,7
	3	*B. aegyptiaca*	15,11191	12,05438	170	27,8	6,1
	4	*B. aegyptiaca*	15,11366	12,05473	167	25,4	6,6
	1	*F. albida*	15,10173	12,05051	362	28	12,9
	2	*F. albida*	15,10222	12,05081	287	29,4	9,8
	3	*F. albida*	15,10227	12,05078	296	28,1	10,5
	4	*F. albida*	12.05056	15,10223	310	30	10,3
Tchad zone soudanienne	1	*B. aegyptiaca*	14,08274	9,64513	179	22,8	7,9
	2	*B. aegyptiaca*	14,08517	9,64718	185	24,6	7,5
	3	*B. aegyptiaca*	14,08312	9,64235	177	25,5	6,9
	1	*F. albida*	14,08860	9,64318	346	27.6	12,5
	2	*F. albida*	14,08470	9,64110	338	29,10	11,6
	3	*F. albida*	14,08915	9,64488	278	28,5	9,7
Sénégal zone sahélienne	1	*B. aegyptiaca*	-15,33447	15,9028	142	34,1	4,2
	2	*B. aegyptiaca*	-15,32110	15,91606	180	28,3	6,7
	3	*B. aegyptiaca*	-15,32230	15,93358	137	31,5	4,4
	4	*B. aegyptiaca*	-15,29183	15,98063	144	31,5	4,6
	5	*B. aegyptiaca*	-15,30823	15,99890	155	25,5	6,1
	6	*B. aegyptiaca*	-15,30741	16,05847	196	28,6	6,9

Dans les deux pays et les trois zones de prélèvement, la densité d'arbres à l'hectare est faible, elle est en moyenne estimée à moins de 10 arbres à l'hectare (figure 3.6 a, 3.6 b). Tous les bois ont été prélevés sur des sols sablo-argileux.

La méthode de prélèvement des échantillons est destructive. Elle correspond à la procédure décrite dans la norme française NF B51-003 de septembre 1985 qui consiste à abattre et transformer les arbres échantillonnés afin d'évaluer les propriétés de leur bois.

Au Tchad, le prélèvement des échantillons a été effectué en abattant chaque arbre à 50 cm au-dessus du sol (figure 3.7.a). Cette hauteur d'abattage a été fixée pour faciliter techniquement l'opération (abattage manuel à la hache). Dans chaque tronc, la première bille d'environ 1 m de long au-dessus de la découpe a été prélevée (figure 3.6.b). Les billes ont été transportées dans une scierie où des rondelles de 20 cm de hauteurs ont été prélevées. Ces rondelles seront utilisées pour usiner les éprouvettes de microdensitométrie, micromécanique et l'analyse des rapports isotopiques. Le restant des billes a été débité en plateaux diamétraux de 60 cm de longueur et 6 cm d'épaisseur à l'aide d'une scie à ruban. Les plateaux et rondelles sciés ont fait l'objet d'un premier séchage naturel de trois mois sous abri sur le site de débit (figure 3.6.c). Des plateaux de 50 cm de longueur finale et de 6 cm d'épaisseur ont été acheminés au CIRAD de Montpellier pour les essais.



(a) (b)

Figure 3.6. Sites de prélèvement : (a) site de Léré ; (b) site de N'Djamena

(a) (b) (c)

Figure 3.7. Chaine de prélèvement des bois : (a) abattage des arbres (b) bille de pied ; (c) plateau diamétral prélevé dans la bille de pied

3.3 Méthodes expérimentales

Deux catégories de méthodes expérimentales ont été considérées. La première concerne les essais conventionnels de caractérisation du bois. Il s'agit d'une étude sur des éprouvettes macroscopiques normalisées. C'est la méthode la plus employée dans la plupart des études de caractérisation du bois.

La seconde concerne l'étude des caractéristiques du bois en fonction de la croissance avec des mesures effectuées localement au niveau des cernes de croissance.

3.3.1 Essais conventionnels de caractérisation du bois

3.3.1.1 Usinage des éprouvettes massives et obtention des poudres d'analyses chimiques

3.3.1.1.1 Usinage des éprouvettes massives pour la mesure des caractéristiques physiques et mécaniques

Les éprouvettes utilisées pour mesurer les caractéristiques physiques et mécaniques ont été obtenues selon le processus suivant (figure 3.8) :

Les plateaux acheminés au Cirad-Montpellier ont été stabilisés en chambre climatique à 20 °C et 65 % d'humidité relative pendant trois semaines (conditions climatiques permettant une stabilisation du bois à une humidité théorique de 12 %).

Après les trois semaines de stabilisation des bois, les sections transversales des plateaux ont été marquées pour repérer la position des ébauches d'éprouvettes destinées aux essais. Le marquage a été réalisé de façon à respecter la bonne orientation des sections des éprouvettes suivant la direction radiale et la direction tangentielle.

Les ébauches (section nominale augmentée d'une surcote) ont été débitées dans les plateaux puis de nouveau stabilisées sous atmosphère contrôlée à 20 °C et 65 % d'humidité relative jusqu'à obtenir un poids quasi constant.

Après stabilisation finale, ces ébauches ont été usinées en barreaux de 20 x 20 mm² de section (dimension radiale x dimension tangentielle) et de longueur égale à la longueur du plateau. Dans ces barreaux, trois groupes d'éprouvettes de même section 20 x 20 mm² mais de longueurs L différentes ont été prélevés en fonction du type d'essai à réaliser :

L = 360 mm pour les essais de flexion (contrainte de rupture et module d'élasticité longitudinal).

L = 60 mm pour les essais de compression.

L = 10 mm pour les propriétés physiques.

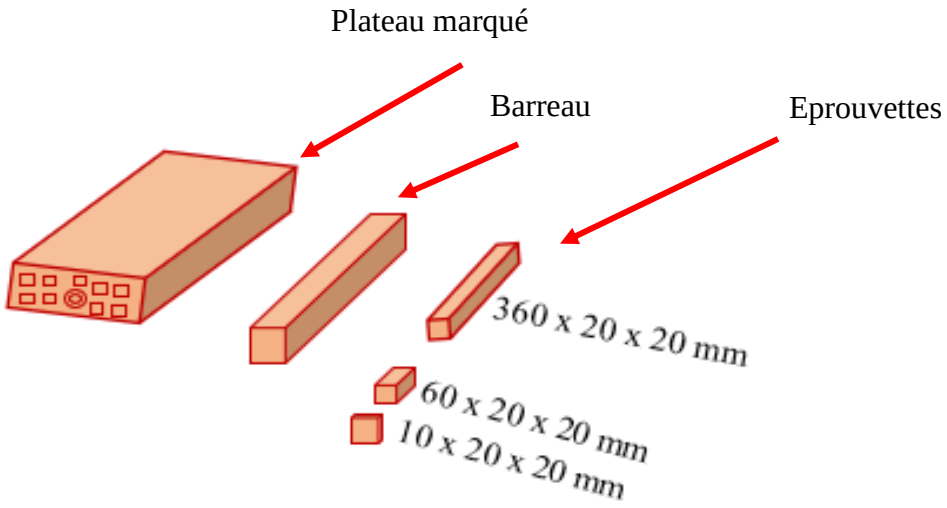


Figure 3.8. Processus d'obtention des éprouvettes

Le nombre total d'éprouvettes utilisées pour les essais physiques et mécaniques est présenté dans le tableau 2.2 par essence et par provenance.

Tableau 3.2. Nombre d'éprouvettes utilisé pour les essais physiques et mécaniques

	Tchad zone sahélienne		Tchad zone soudanienne		Sénégal zone sahélienne	
	Faidherbia albida	*Balanites aegyptiaca*	*Faidherbia albida*	*Balanites aegyptiaca*	*Faidherbia albida*	*Balanites aegyptiaca*
Caractéristiques physiques	27	20	29	17	187	56
Caractéristiques mécaniques	54	40	58	34	374	112

3.3.1.1.2 Poudres de bois pour les analyses chimiques

Les poudres d'analyses chimiques ont été obtenues par double broyage de fragments de bois prélevés de manière aléatoire dans des tranches de plateaux diamétraux. Le premier broyage a consisté à réduire la taille des échantillons jusqu'à 4 mm maximum à l'aide d'un broyeur à couteau (figure 3.9 a) ; les particules obtenues lors de ce broyage ont été réduites au moyen d'un second broyeur à marteau (figure 3.9 b), jusqu'à une granulométrie de 0,02 mm (figure 3.8 c) correspondant à la taille définie dans notre protocole d'étude.

(a) (b) (c)

Figure 3.9. (a) broyeur à couteau ; (b) broyeur à marteau ; (c) poudre de bois

Après le second broyage, les poudres ont été préparées suivant les deux systèmes d'extraction mis en œuvre dans l'étude : extraction Soxtec à l'UMR AGAP ; dans un second temps, pour cause d'indisponibilité d'installations à l'UMR AGAP, une partie des échantillons a été extraite à BioWooEB par la méthode Soxhlet.

Pour l'extraction Soxtex, 1,1 g de poudre a été introduit dans le sachet Ankom (figure 3.10 a), le tout est pesé puis séché à l'étuve à 105 °C pendant 2 h.

Pour l'extraction Soxleh, on sèche la poudre, le coton et la cartouche à l'étuve à 60 °C pendant 24 h (figure 3.10 b).

(a) (b)

Figure 3.10. (a) poudre dans le sachet Ankom; (b) poudre, coton, cartouche dans l'étuve

Soixante poudres ont été préparées pour l'extraction Soxtec, et dix-neuf pour l'extraction Soxhlet. Les taux de lignine, de cellulose, d'hémicellulose ont été déterminés pour toutes les poudres extraites ; les extraits obtenus par la méthode soxhlet ont été analysés au GCMS. Le tableau 3.3 ci-dessous récapitule le nombre d'échantillons préparés par essence et par provenance pour les analyses chimiques.

Tableau 3.3. Echantillons pour les analyses chimiques par essence et par provenance

	Tchad zone sahélienne		Tchad zone soudanienne		Sénégal zone sahélienne	
	F. albida	*B. aegyptiaca*	*F. albida*	*B. aegyptiaca*	*F. albida*	*B. aegyptiaca*
Extraction Soxtec	10	10	10	10	10	10
Extraction Soxhlet	4	3	3	3	3	3
Cellulose, hémicelluloses, lignine	14	13	13	13	13	13
Analyse GCMS	4	3	3	3	3	3

3.3.1.1.3 Usinage des éprouvettes pour la mesure d'angle de microfibrilles (AMF)

Les éprouvettes utilisées pour la mesure d'angle des microfibrilles ont été prélevées dans les doublons d'éprouvettes correspondant aux retraits les plus élevés et aux retraits les faibles avec comme objectif de mieux comprendre certaines tendances de variation de ces caractéristiques. La dimension des éprouvettes définie par le protocole d'essai est 5 x 2 x 10 mm^3 (L, R, T). Les mesures ont été effectuées uniquement sur les éprouvettes de *Faidherbia albida* prélevées au Tchad. Le nombre total d'éprouvettes utilisées pour chaque provenance est présenté dans le tableau 3.4 ci-dessous.

Tableau 3.4. Nombre total d'éprouvettes de *Faidherbia albida* par provenance pour la mesure d'AMF

	Tchad zone sahélienne	Tchad zone soudanienne
Nombre d'éprouvettes	4	4

3.3.1.2 Détermination des caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques ont été déterminées sur des éprouvettes de 10 x 20 x 20 mm^3 (L, R, T), excepté la masse volumique à 12 % d'humidité qui a été déterminée simultanément au

module d'élasticité à l'aide du dispositif Bing©. Les propriétés étudiées sont les suivantes : masse volumique et infradensité, retraits linéaires de séchage, retrait volumique total, point de saturation des fibres et anisotropie de retrait déduite des retraits linéaires. Ces propriétés ont été déterminées suivant un protocole unique.

Mode opératoire

La préparation des éprouvettes a consisté dans un premier temps à poncer à l'aide de papier de verre leurs arêtes afin de travailler sur des surfaces parfaitement planes. Dans un second temps, afin que les mesures de dimension se fassent toujours à la même position à chaque étape de stabilisation, un repère circulaire a été marqué à l'encre à l'aide d'un tube en plastique au centre des faces correspondant au plan RL et LT (figure 3.11).

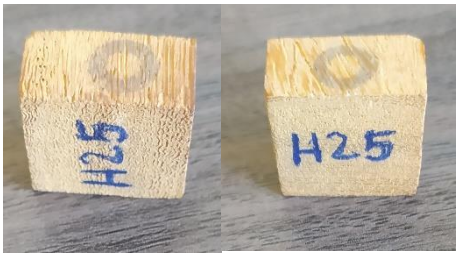


Figure 3.11. Marquage des éprouvettes à l'encre sur les plans RL et TL

Dans un premier temps, les éprouvettes ont été saturées dans de l'eau distillée pendant trois jours. Elles ont été soumises à trois cycles de vide-pression dans un autoclave afin de chasser d'éventuelles poches d'air piégées dans le bois.

Après saturation, les éprouvettes ont été pesées, leurs dimensions radiale et tangentielle ont été mesurées, et leurs volumes déterminés. Le volume saturé a été obtenu par la méthode de la double pesée (utilisation du principe de la poussée d'Archimède) : ce volume est déterminé par le poids du volume d'eau déplacé dans un bécher lors de l'immersion d'une éprouvette dans ce bécher rempli d'eau et pesé avant puis après l'immersion.

Après cette première étape de mesures à l'état saturé, et en vue de déterminer le point de saturation des fibres (PSF), les éprouvettes ont été stabilisées en enceinte climatique successivement à 85 % d'humidité relative de l'air et 30 °C (équilibre hygroscopique du bois voisin de 18 %), 65 % d'humidité relative de l'air et 20 °C (équilibre hygroscopique voisin de 12 %) puis 30 % d'humidité relative de l'air et 20 °C (équilibre hygroscopique voisin de 6 %).

Elles ont été enfin stabilisées jusqu'à l'état anhydre en étuve sèche à 103 °C. Selon la norme française NF EN 13183-1 de juin 2002, un échantillon de bois est considéré comme anhydre lorsque la variation de sa masse entre deux pesées successives dans un intervalle de 2 heures ne dépasse pas 0,1 %.

A chaque état stabilisé, la masse et les dimensions radiale et tangentielle des éprouvettes ont été mesurées. Ces mesures ont permis de déterminer les cinq propriétés étudiées et les deux propriétés déduites.

Les appareils utilisés pour ces mesures sont les suivants :

- Une balance de marque Sartorius de précision 0,001 g (figure 3.12a).

- Un comparateur de marque Mitutoyo de précision 0,001 mm (figure 3.12b).

Figure 3.12a. Balance Sartorius

Figure 3.12b. Comparateur Mitutoyo

*** Infradensité et masse volumique**

L'infradensité « d » est déterminée en faisant le rapport entre la masse anhydre Ma et le volume saturé Vs.

$$d = \frac{M_a}{V_s} \qquad (3.1)$$

La masse volumique a été déterminée simultanément au module d'élasticité longitudinal (paragraphe 3.3.1.3 premier astérisque).

*** Retraits linéaires**

Les trois retraits linéaires de séchage sont le retrait longitudinal, le retrait radial et le retrait tangentiel. Le retrait longitudinal est délicat à mesurer sur des éprouvettes de petite dimension car sa valeur est très faible (Guibal *et al.* 2015). Dans le cadre de notre étude, seuls les deux

retraits transversaux, le retrait radial et le retrait tangentiel ont été mesurés. Ces deux paramètres ont été déterminés selon les préconisations de la norme NF B 51 – 006 de septembre 1958. Ils s'expriment en pourcentage (%). Les formules qui permettent de les calculer sont les suivantes :

*** Retrait radial :**

$$R_r(\%) = \frac{Drs - Dra}{Drs} * 100 \qquad (3.2)$$

Avec :

R_r, le retrait radial

Drs la dimension radiale de l'éprouvette à l'état saturé ;

Dra la dimension radiale de l'éprouvette à l'état anhydre.

*** Retrait tangentiel :**

$$R_t(\%) = \frac{Dts - Dta}{Dts} * 100 \qquad (3.3)$$

Avec :

R_t, le retrait tangentiel ;

Dts la dimension tangentielle de l'éprouvette à l'état saturée ;

Dta la dimension tangentielle de l'éprouvette à l'état anhydre.

*** Retrait volumique total**

Le trait volumique de séchage total (R_B) a été déterminé en faisant la somme du retrait radial et du retrait tangentiel. Le retrait longitudinal étant le plus souvent très faible par rapport aux retraits linéaires transversaux, la somme du retrait radial et du retrait tangentiel (R_R+R_T) constitue une bonne approximation du retrait volumique.

$$R_B = R_R + R_T \qquad (3.4)$$

*** Anisotropie de retrait**

L'anisotropie du retrait correspond au rapport entre le retrait tangentiel et le retrait radial.

$$Anisotropie = \frac{R_t}{Rr} \qquad (3.5)$$

C'est une grandeur sans unité

*** Point de saturation des fibres (PSF)**

Le PSF est déterminé par l'ordonnée à l'origine des droites de régression linéaire entre les variations de surface transversale des échantillons et leur taux d'humidité (figure 3.13) : [Taux d'humidité] = f [Variations surfaciques]. Il correspond au taux humidité au-delà duquel les variations dimensionnelles sont nulles. Il est obtenu en stabilisant les échantillons de bois à différents taux d'humidité intermédiaires entre l'état saturé et l'état anhydre, à des conditions de température et d'humidité relative de l'air correspondant à des taux d'humidité théorique du bois successivement proches de 18 %, 12 %, et 6 % et en mesurant leurs poids et dimensions comme indiqué précédemment.

La surface transversale est calculée en faisant le produit des dimensions radiale et tangentielle de la section transversale de l'éprouvette suivant les taux d'humidités de stabilité.

$$\Delta s\ (18\%) = Dr\ (saturé) * Dt\ (saturé) - Dr\ (18\ \%) * Dt\ (18\ \%) \quad (3.6)$$

$$\Delta s\ (12\%) = Dr\ (saturé) * Dt\ (saturé) - Dr\ (12\ \%) * Dt\ (12\ \%) \quad (3.7)$$

$$\Delta s\ (6\ \%) = Dr\ (saturé) * Dt\ (saturé) - Dr\ (6\ \%) * Dt\ (6\ \%) \quad (3.8)$$

$$\Delta s\ (0\ \%) = Dr\ (saturé) * Dt\ (saturé) - Dr\ (0\ \%) * Dt\ (0\ \%) \quad (3.9)$$

Avec :

Δs (18%) : variation surfacique au voisinage de 18 % d'humidité ;

Δs (12%) : variation surfacique au voisinage de 12 % d'humidité ;

Δs (6%) : variation surfacique au voisinage de 6 % d'humidité ;

Δs (0%) : variation surfacique au voisinage de 0 % d'humidité ;

Dr : dimension radiale ;

Dt : dimension tangentielle.

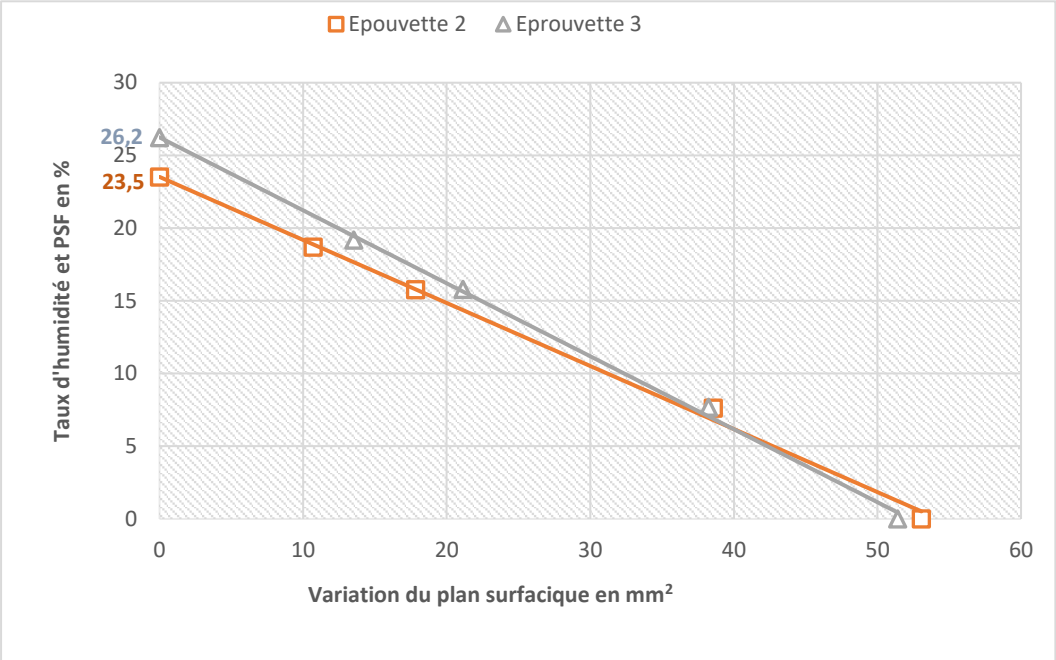


Figure 3.13. Exemple de détermination du PSF de deux éprouvettes de *Balanites aegyptiaca* par calcul de l'ordonnée à l'origine des courbes [Taux d'humidité] = f [Variations surfaciques]

3.3.1.3 Mesure de l'angle des microfibrilles par diffraction à rayon X

Cette mesure a été réalisée à l'Institut Européen des Membranes (Montpellier) sur les éprouvettes décrites dans le paragraphe 3.3.1.1.3. L'objectif de la mesure est de déterminer la façon dont varie l'angle des microfibrilles en fonction de la provenance des bois, puis de faire le lien entre les résultats obtenus et les variations de retraits linéaires.

L'appareil utilisé pour effectuer cette mesure est un diffractomètre Oxford Diffraction (figure 3.14). Le principe de la mesure consiste à faire traverser l'échantillon par un faisceau monochromatique de rayons X pendant une courte durée. La tension d'accélération des électrons dans le tube RX est de 40kV et l'intensité de 40mA. Le cliché de signal enregistré a été récupéré puis traiter par un programme VBA sur Excel développé par le laboratoire de mécanique et génie civil (LMGC).

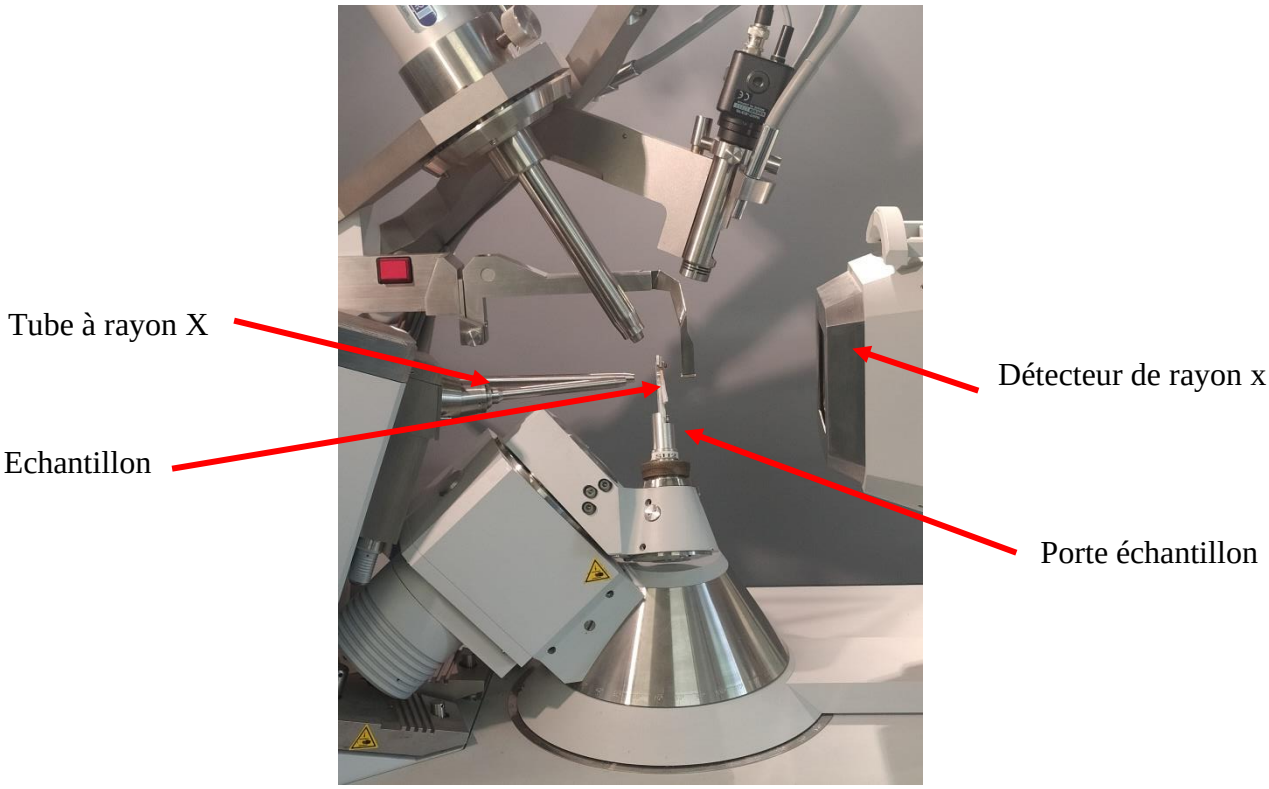


Figure 3.14. Diffractomètre Oxford Diffraction

3.3.1.4 Caractéristiques mécaniques

*** Mesure du module d'élasticité longitudinale et de la masse volumique par méthode vibratoire**

Le module d'élasticité longitudinal a été déterminé par la méthode non destructive développée par le CIRAD (méthode BING© = Beam Identification by Nondestructive Grading). Le principe de cette méthode repose sur l'étude des vibrations d'une pièce de bois ou de tout autre matériau. Elle offre la possibilité de réaliser plusieurs mesures sur une même éprouvette. La mesure nécessite une éprouvette élancée, de géométrie régulière, sans défaut, et dont les conditions d'appui sont maîtrisées. L'éprouvette est soumise à des vibrations longitudinales ou transversales dont l'enregistrement et l'analyse des signaux conduisent à la détermination des caractéristiques recherchées. Le principe de la mesure consiste à analyser les fréquences propres de résonnance obtenues après une excitation impulsionnelle sur l'une des extrémités d'une éprouvette reposant sur deux bracelets élastiques de faible rigidité (Bordonné, 1989).

Le dispositif d'analyse est composé d'une balance, d'un support-échantillon, d'un microphone, d'un filtre amplificateur, d'un convertisseur de signal analogique en signal numérique, d'un tube de sollicitation à bille ou d'un maillet, et d'un PC pour l'acquisition et le traitement des données (figure 3.15).

Les mesures ont été réalisées sur des éprouvettes de 360 x 20 x 20 mm^3 stabilisées en conditions standard à 20 °C et 65 % d'humidité relative de l'air, soit une humidité théorique du bois de 12 %. L'espacement entre les deux bracelets élastiques est d'environ la moitié de la longueur de l'éprouvette ; la précision de cet écartement est sans impact sur la mesure (Bordonné, 1989).

Le mode opératoire se présente comme suit :

Au début de l'essai, la section radiale, tangentielle et la longueur des éprouvettes ont été mesurées respectivement à l'aide d'un pied à coulisse digital de marque Mitutoyo de précision 0,01 mm, et d'une règle métallique millimétrée. La mesure des dimensions radiale et tangentielle se fait en trois points sur la longueur de l'éprouvette et les 3 valeurs obtenues sont moyennées. Pour chaque éprouvette, les valeurs lues sont rentrées manuellement dans le logiciel d'acquisition des données au début de l'essai. On mesure ensuite la masse de l'échantillon en pesant l'éprouvette sur une balance de marque Precisa, de précision 0,01 g. Les valeurs sont automatiquement enregistrées dans le logiciel.

Après cette phase de paramétrage, l'éprouvette est positionnée sur les deux supports élastiques de faible rigidité du porte-échantillon afin que le signal soit correctement enregistré par le microphone. Elle est par la suite sollicitée par le maillet à l'extrémité opposée à celle du microphone. Le signal capté par le microphone est amplifié, filtré et numérisé par l'amplificateur et le convertisseur. L'interface du logiciel Bing permet de visualiser les signaux qui par une transformée de fourrier rapide affiche les pics correspondant aux fréquences propres.

Pour obtenir le module d'élasticité longitudinal, on sélectionne les trois pics correspondant aux fréquences propres les plus élevées. Le module est automatiquement calculé par le logiciel à partir des masses, dimensions et fréquences sélectionnées.

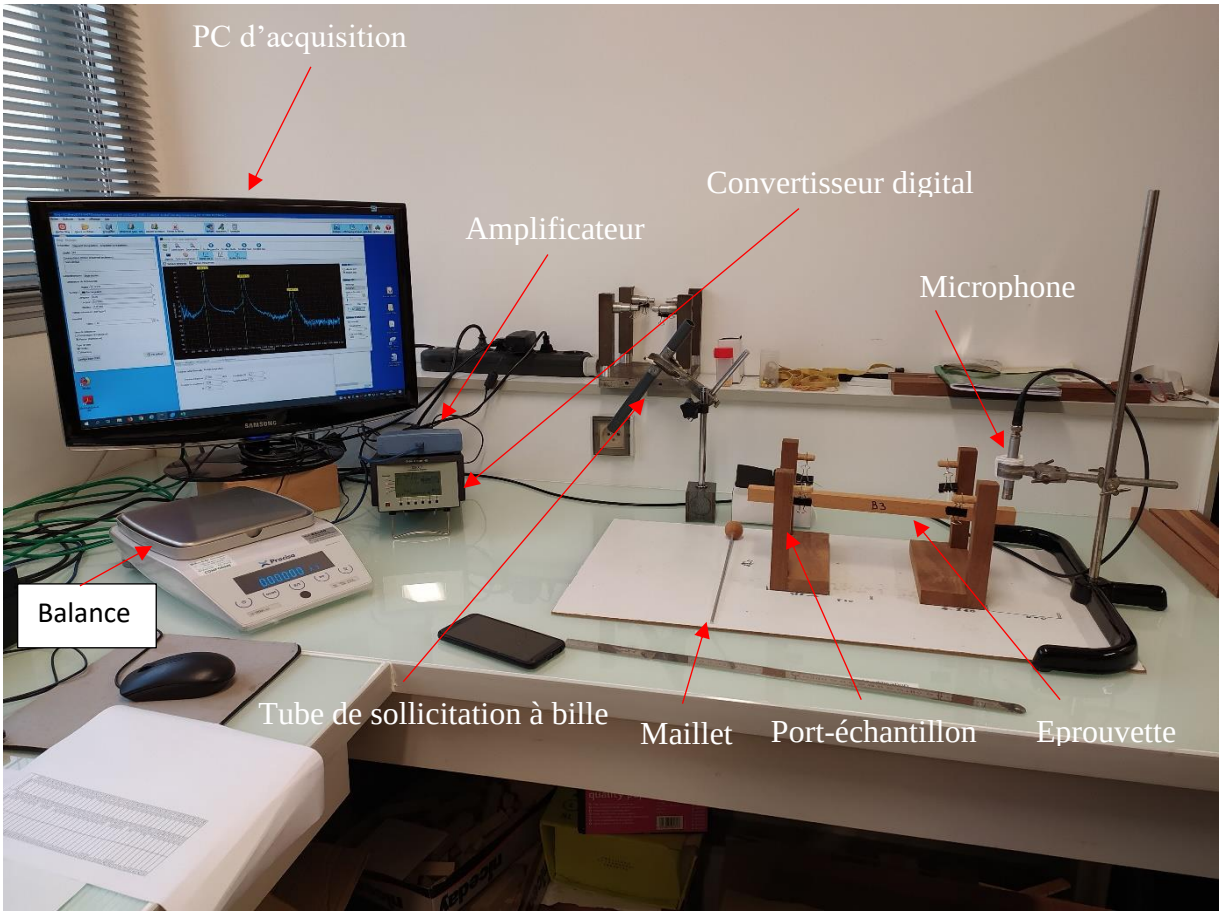


Figure 3.15. Dispositif du BING

*** Contrainte de rupture en compression longitudinale**

La contrainte de rupture en compression longitudinale a été déterminée selon la méthode de mesure définie par la norme NF ISO 13061-17 (juin 2018). Les mesures sont effectuées sur des éprouvettes normalisées orientées longitudinalement, de dimension 60 x 20 x 20 mm^3 (L, R, T) et stabilisées en conditions standards (20° C, 65 % d'humidité relative). Les essais ont été réalisés sur une machine universelle de marque ADAMEL (figure 3.16) équipée d'une cellule de charge maximale de 100 kN. La machine est constituée d'un plateau rotulé fixe sur lequel l'échantillon est posé et d'une cellule de charge permettant d'appliquer la force de compression à l'échantillon.

Le déroulement de l'essai se présente comme suit :

Les dimensions radiale et tangentielle (moyenne en trois point) et la masse des éprouvettes sont préalablement mesurées à l'aide d'un pied à coulisse de marque Mitutoyo de précision 0,01 mm

et d'une balance de marque précisa précision 0,01 g. Ces valeurs sont rentrées manuellement pour chaque éprouvette au début de l'essai.

Après la mise en place de l'éprouvette sur le plateau rotulé, on lance l'essai qui débute par un cycle automatique d'accommodation avec un chargement de 400 N et un déchargement à 200 N répété trois fois dès le contact entre le plateau supérieur du banc de test et l'éprouvette. Le pilotage du banc de test est automatique, et l'essai est réalisé à une vitesse constante fixé dans notre cas à 0,01 mm/s. L'essai s'arrête automatiquement dès la rupture de l'éprouvette. L'acquisition des données (charge, déplacement) est faite à l'aide d'un ordinateur. La contrainte de rupture est obtenue en faisant le rapport entre la force appliquée et la section de l'éprouvette :

$$\sigma = \frac{F}{A} \qquad (3.11)$$

σ : contrainte de rupture en compression (MPa) ;

F : charge à la rupture (N) ;

A : section de l'éprouvette (mm^2).

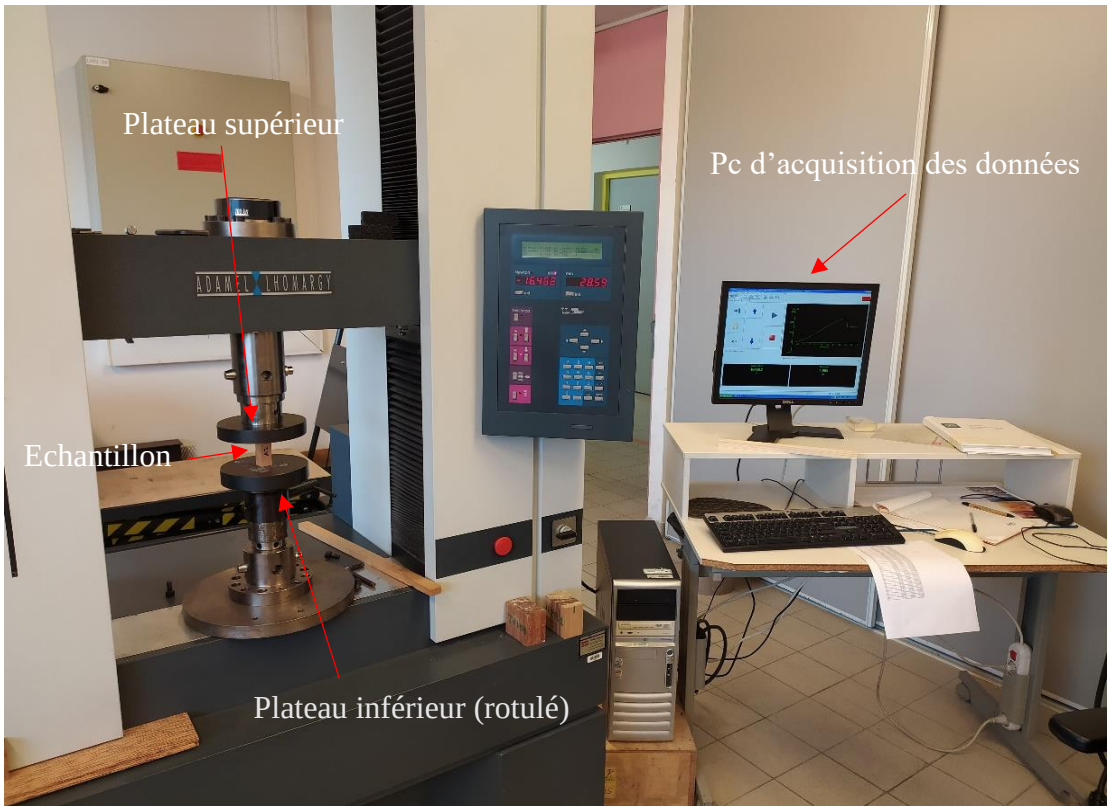


Figure 3.16. Banc de test de compression

*** Contrainte de rupture en flexion statique**

La contrainte de rupture en flexion statique a été déterminée sur des bois stabilisés en conditions standards suivant la norme française NF B 51-008 (26 juillet 2017). Les éprouvettes testées sont celles utilisées précédemment pour déterminer le module d'élasticité longitudinal (dimension 360 x 20 x 20 mm^3 L, R, T). La machine utilisée est la même que celle pour les essais de compression, en adaptant le bâti (figure 3.17). La durée de l'essai est de 1,5 ± 0,5 minutes. La contrainte maximale est déterminée suivant la formule ci-dessous :

$$\sigma = \frac{3P(l-a)}{2bh^2} \qquad (3.12)$$

σ : contrainte de rupture en flexion (MPa) ; P : charge totale de rupture (N) ; l : distance entre les rouleaux du bâti (320 mm) ; a : distance entre les rouleaux supérieur (160 mm) ; b : largeur de l'éprouvette (mm) ; h : hauteur de l'éprouvette (mm)

A l'issue de l'essai, le taux d'humidité des éprouvettes est déterminé suivant le protocole défini dans la norme NF EN 13183-1 (juin 2002).

Figure 3.17. Banc de test de flexion

3.3.1.5 Caractéristiques chimiques

Les caractéristiques chimiques déterminées sont les taux d'extractibles, de lignine, d'hémicelluloses et de cellulose. Le mode opératoire pour déterminer chaque caractéristique est le suivant :

*** Taux d'extractibles**

Deux méthodes ont été utilisées pour réaliser les extractions, la méthode Soxtec et la méthode Soxhlet.

***Extraction Soxtec* :**

L'unité d'extraction automatisée Soxtec permet d'extraire rapidement les composés solubles de la poudre de bois. Les solvants utilisés pour cette extraction sont l'éthanol et l'eau.

Les étapes d'extraction sont les suivantes :

Les sachets préparés précédemment (1,1 g de poudre de bois introduite dans un sachet Ankom, le tout pesé puis séché à l'étuve à 105 °C pendant 2 h) sont introduits dans chaque ballon de l'unité d'extraction, à raison de 8 sachets maximum par ballon, additionnés de 500 ml d'éthanol 96 %. Les ballons sont positionnés sur les chauffe-ballons (figure 3.18.a).

Après ébullition de l'éthanol (78 - 80 °C), la durée de l'extraction est de 30 minutes. L'éthanol est vidé (figure 3.18.b) puis 500 ml d'éthanol sont de nouveau ajoutés pour une 2ème extraction.

La double extraction à l'éthanol est suivie par une double extraction à l'eau chaude (500 ml d'eau chaude utilisée).

A l'issue de l'extraction, les sachets Ankom sont essorés sur papier absorbant, séchés à 60 °C à l'étuve pendant 12 heures puis à 105 °C pendant 2h, puis refroidis avant d'être pesés.

Le taux d'extractible est le rapport entre la différence de masse entre la poudre brute et la poudre extraite, et la masse de poudre brute.

$$\% \text{ Extractible} = \frac{\text{Masse poudre brute} - \text{Masse poudre extraite}}{\text{Masse de la poudre brute}} * 100 \qquad (3.13)$$

(a) (b)

Figure 3.18. (a) unité d'extraction Soxtec ; (b) ballon contenant des échantillons

Extraction Soxhlet :

Dix-neuf échantillons de bois ont été extraits par cette méthode. Les extraits récupérés ont été par la suite analysés par GC-MS.

Pour l'extraction nous avons utilisé successivement un mélange éthanol-toluène (1:1, v/v) (Carlo Erba Reagents – Val-de-Reuil, France) puis de l'eau distillée. Ces deux solvants permettent une séparation et quantification plus précise des extractibles.

Les étapes de l'extraction sont les suivantes :

* La cartouche sèche est pesée puis remplie de 2 à 3 g de poudre de bois anhydre, puis l'ensemble est de nouveau pesé.

* La cartouche contenant l'échantillon est bouchée à l'aide de coton puis pesée.

* Le ballon est posé sur la plaque chauffante, la cartouche est insérée dans le soxhlet, 200 ml du premier solvant d'extraction (mélange éthanol - toluène) sont ajoutés, et l'extraction est lancée (figure 3.19 a).

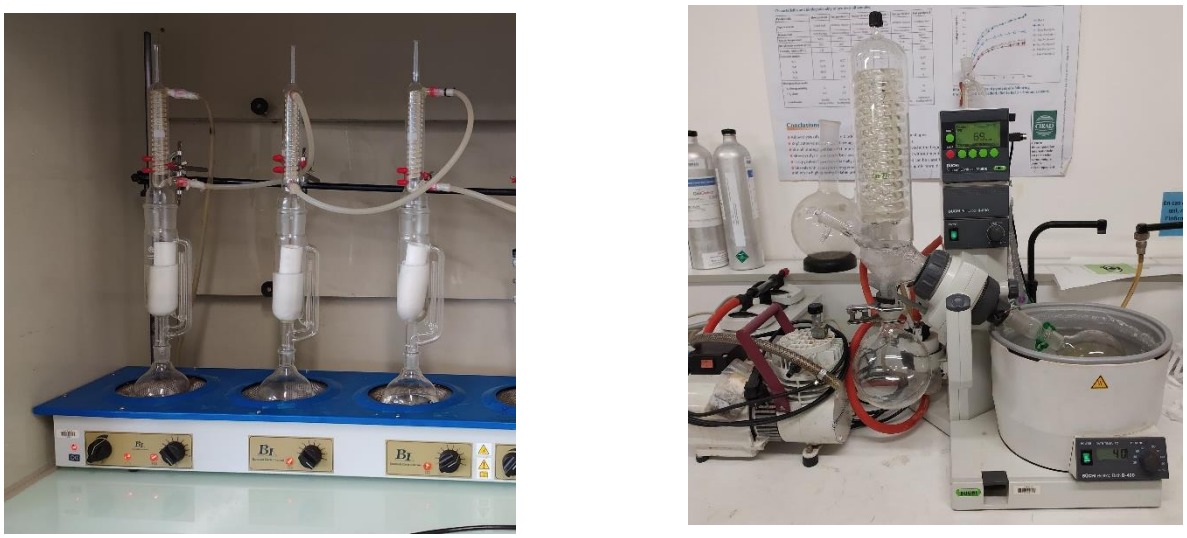
Après l'extraction au mélange éthanol-toluène, le ballon est récupéré et le solvant évaporé à l'évaporateur rotatif (rotavap) (figure 3.19 b). Après l'évaporation, on sèche le ballon à l'étuve pendant 12 h à 60 °C, on le laisse refroidir ensuite, puis on effectue une dernière pesée.

Après la pesée, une seconde extraction est lancée avec le deuxième solvant (eau).

L’extraction avec un solvant est considérée comme complète lorsque le liquide dans le Soxhlet est limpide. Le temps moyen d’extraction par solvant a été d’environ 12 h.

A la fin de l’extraction, on sèche la cartouche dans l’étuve à 60 °C pendant 12 h, puis à 103 °C pendant 2h. On laisse refroidir ensuite puis on pèse.

Les extraits récupérés après évaporation du solvant du ballon ont été conservés dans du méthanol puis envoyés à au LERMAB de Nancy pour l’analyse GCMS.



(a) (b)

Figure 3.19. (a) unité d’extraction Soxhlet ; (b) unité d’évaporation

*** Analyse GC-MS**

La GC-MS (Chromatographie en phase Gazeuse couplée avec un Spectromètre de Masse) permet de séparer, d’identifier et/ou de quantifier les composés d’une solution.

Son principe repose sur la distribution des composées entre deux phases non miscibles, une phase mobile (gaz vecteur) et une phase stationnaire (silice greffée). Les composés ont ainsi des temps de rétention différents dans la colonne et sont alors séparés.

L’analyse a été réalisée ici à l’aide d’un chromatographe en phase gazeuse de type PERKIN ELMER CLARUS 680, couplé à un spectromètre de masse de type PERKIN ELMER CLARUS SQ8, un ensemble piloté par le logiciel TurboMass v.6.1 et disposant d’une base de données NIST MS Search 2.0 de 2011.

Avant injection, les échantillons sont dérivés afin de faciliter la détection de tous les composés présents. Pour cela, 2 mg d'extractibles sont solubilisés avec 50 µL de BSTFA+TMSCl 1% (un agent de silylation) dans un pilulier de 2 ml. Cette préparation est placée pendant 120 min, pilulier fermé, dans une étuve à 70 °C, pour permettre la réaction de l'agent de dérivation sur les extractibles.

Le pilulier est ensuite ouvert pour laisser évaporer le BSTFA. 1 ml d'acétate d'éthyle est enfin ajouté dans le pilulier afin de solubiliser les extractibles silylés, puis 1µl de cette dernière solution est injecté en mode splitless dans le GC, via un injecteur chauffé à 250 °C.

La séparation chromatographique est réalisée par une phase stationnaire DB-5MS avec un programme de température de four de 40 min, comprenant un palier de 2 min à 80 °C, une montée à 10 °C/min jusqu'à 190 °C, une montée à 15 °C/min jusqu'à 280 °C, température maintenue ensuite pendant 10 min, et enfin un dernier palier à 300 °C atteint à 10 °C/min et maintenu 14 min, et une phase mobile constituée d'hélium à 1 mL/min.

Après séparation, les composés sont envoyés dans le spectromètre de masse via une ligne de transfert thermostatée à 250 °C puis ionisés à 70eV.

*** Taux de lignine**

Le taux de lignine a été déterminé en utilisant la méthode de Klason. Cette méthode consiste à traiter la poudre extraite du bois à l'acide sulfurique concentrée à 72%, puis à réaliser une acidolyse à chaud (1h à 121 °C) à l'acide sulfurique 3%, ce qui permet de dégrader la cellulose et de récupérer la lignine.

Le mode opératoire est le suivant :

Préalablement aux essais, les ustensiles utilisés sont séchés à 105 °C pendant 2 heures.

Une quantité de 360 mg de poudre de bois extraite est mise à sécher dans un bécher à 105 °C pendant 2 heures puis refroidie.

Un volume de 5 ml d'acide sulfurique est versé sur la poudre, le tout est mélangé à l'aide d'un pilon jusqu'à obtenir une pâte homogène puis mis au bain de marie à 20 °C pendant 2 heures en remuant toutes les 10 à 15 minutes.

Le mélange est ensuite dilué à l'eau distillée pour obtenir une concentration de 3 %.

Les flacons contenant le mélange sont passés à l'autoclave pendant 1h à 121 °C.

Après refroidissement, les mélanges sont filtrés (figure 3.20), laissés à égoutter pendant 12 heures sous hotte, puis séchés pendant 2h à 105 °C.

Le taux de lignine est le rapport entre la masse du résidu de la poudre traitée à l'acide sulfurique et la masse de poudre de bois extraite.

$$\% \text{ Lignine} = \frac{\text{Masse de residu}}{\text{Masse de la poudre extraite}} * 100 \qquad (3.14)$$

Figure 3.20. Filtration de la lignine

*** Taux d'holocellulose, de cellulose et d'hémicelluloses**

L'holocellulose, constituée de la cellulose et des hémicelluloses, est obtenue en éliminant la lignine de la poudre de bois extraite. Pour son extraction, le mode opératoire est le suivant :

1g de poudre de bois extraite est mis au bain-marie à 76 °C avec 80 ml de solution tampon d'acétate et 2 ml de solution de chlorite de sodium, le tout avec agitation pendant 4 heures ; 2 ml de chlorite de sodium sont ajoutés toutes les heures au mélange qui prend l'aspect d'une pâte de couleur jaunâtre (figure 3.21.a).

Après le bain-marie, le mélange est refroidi, filtré, puis lavé deux fois à l'acétone (figure 3.21.b). Le résidu obtenu est séché pendant 2h à 105 °C, puis refroidi au dessiccateur avant d'être pesé.

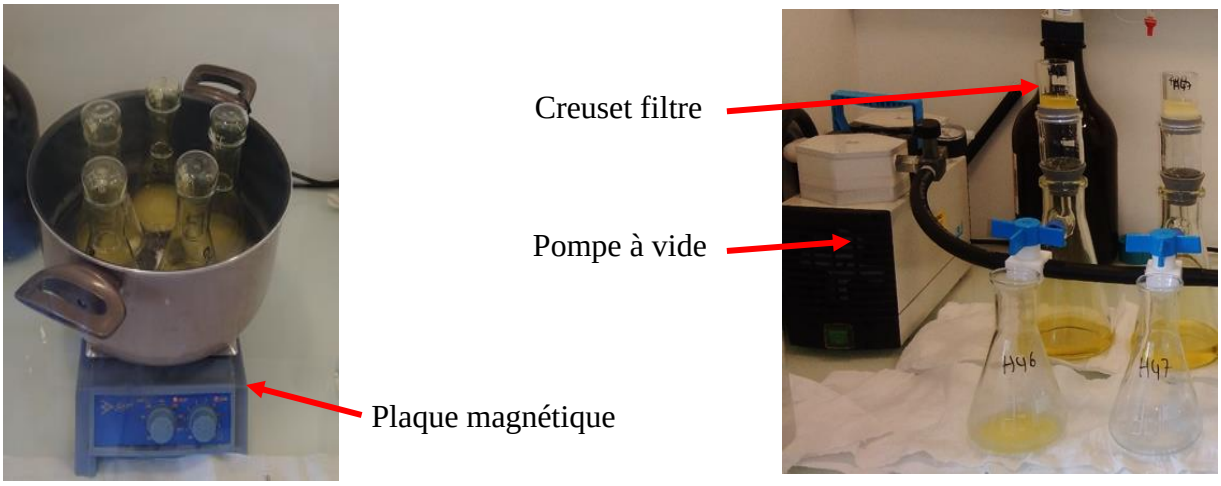


Figure 3.21. (a) : Mélange poudre et réactifs au bain-marie ; (b) : filtration de résidu

Le taux d'holocellulose est le rapport entre le résidu de la poudre traitée et celui de la poudre extraite prise au départ.

$$\% \text{ Holocellulose} = \frac{\text{Masse de résidu}}{\text{Masse de la poudre extraite}} * 100 \qquad (3.15)$$

Le mode opératoire pour l'obtenir la cellulose à partir de l'holocellulose est le suivant :

L'ensemble de la manipulation se fait au bain-marie à 20 °C.

5 ml de NaOH 17,5 % sont ajoutés à 800 mg d'holocellulose, constituant un mélange homogène après 5 mn de contact. Le mélange est mis au bain-marie à 20 °C ; 2,5 ml de NaOH 17,5 % sont ajoutés toutes les 5 minutes, ceci à trois reprises. 16,5 ml d'eau ultra pure sont ajoutés au mélange qui est ensuite laissé à décanter pendant environ 1h, puis filtré après ajouts successifs de 50 ml de NaOH à 8,3 % et 7,5 ml d'acide acétique à 10 %. Le pH doit être contrôlé et compris entre 5 et 6, ou sinon ajusté par ajout d'acide acétique. Le résidu obtenu est séché sous hotte durant 12 heures puis séché à l'étuve à 105 °C pendant 2 heures (figure 3.22).

Figure 3.22. Cellulose disposée dans l'étuve pour le séchage

Le taux de cellulose est le rapport entre la masse du résidu obtenu et la masse sèche d'holocellulose prise au départ.

$$\% \text{ Cellulose} = \frac{\text{Masse résidu}}{\text{Masse holocellulose}} * 100 \qquad (3.16)$$

Le taux d'hémicellulose est la différence entre le taux d'holocellulose et la cellulose.

% Hémicellulose = % Holocellulose - % Cellulose (3.17)

3.3.2 Caractérisation du bois en fonction de la croissance des arbres

3.3.2.1 Préparation des échantillons

3.3.2.1.1 Eprouvettes de microdensitométrie

La microdensitométrie est une technique d'analyse de cerne basée sur la radiographie de barrettes d'épaisseur uniforme. Elle permet de quantifier les variations locales de densité cerne par cerne.

Les éprouvettes utilisées pour cette analyse sont des plaquettes radiales de 15 mm de large et d'épaisseur 2 mm. Ces éprouvettes ont été usinées sur 4 rayons perpendiculaires dans les rondelles de bois d'environ 20 cm d'épaisseur.

Le processus de prélèvement est le suivant :

A l'aide d'une scie à ruban, on prélève dans chaque rondelle initiale une rondelle de 2 cm de hauteur. Ensuite, chaque rondelle de 2 cm de hauteur est divisée en quatre quartiers centrés sur la moelle (figure 3.23a). Sur chaque quartier, à l'aide d'une scie fraise jumelée, on usine deux barrettes radiales de 2 mm d'épaisseur suivant la direction longitudinale et de 15 mm de largeur (figure 3.23b). Les éprouvettes usinées sont par la suite stabilisées jusqu'à une humidité d'environ 11 %.

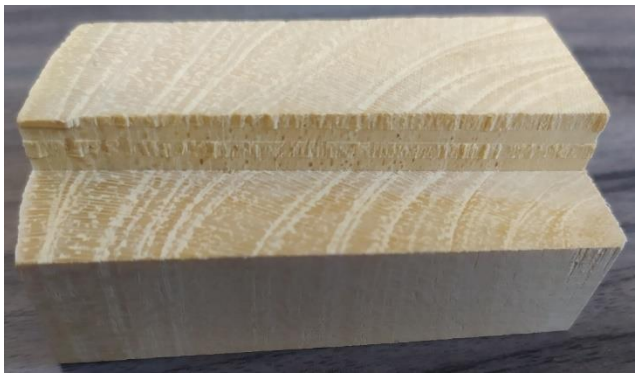


Figure 3.23a. Quartier de rondelle après usinage de la barrette.

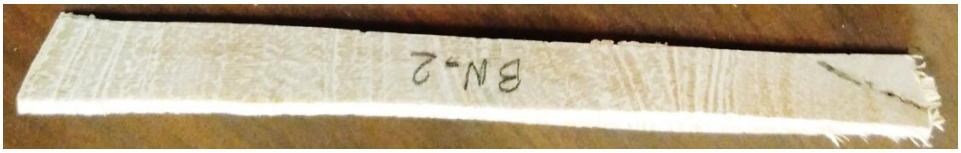


Figure 3.23b. Plaquette radiale.

3.3.2.1.2 Eprouvettes de micromécanique

Les essais de micromécanique consistent à tester des petites éprouvettes sous forme d'allumettes sur un micro-banc d'essai de flexion trois points. La dimension des éprouvettes est de 45 * 2 * 2 mm^3 L*R*T maximale. Pour notre étude, les éprouvettes ont été usinées localement au niveau des cernes. Le protocole d'usinage est le suivant :

Une rondelle de 45 mm d'épaisseur correspondant à la hauteur des éprouvettes a été débitée dans un billon de 20 cm. La rondelle a été par la suite divisée en deux, puis l'une des moitiés divisées en deux parties suivant la moelle. Sur l'un des quartiers, on trace les limites longitudinales des cernes, et à l'aide d'une petite scie circulaire, on découpe trois plaquettes de 2 mm d'épaisseur suivant la direction tangentielle (figure 3.24a). Sur chaque plaquette, des éprouvettes de largeur 2 mm suivant la largeur des cernes tracés sont découpées (figure 3.24b).

(a) (b)

Figure 3.24. (a) Plaquette de 2 mm d'épaisseur ; (b) Eprouvettes de micromécanique.

3.3.2.1.3 Echantillons de mesures isotopiques

Les échantillons utilisés pour la mesure des isotopes stables de carbone sont des poudres de bois prélevé dans les cernes et obtenues en ponçant à l'aide d'une râpe métallique les barrettes radiales utilisées précédemment pour la microdensitométrie (figure 3.25.a).

Avant de procéder au ponçage, la limite de chaque cerne est marquée. Afin d'éviter toute contamination entre les poudres, une feuille A4 est utilisée pour récupérer la poudre de chaque cerne. Entre deux ponçages, la râpe est nettoyée à l'aide de deux brosses (une métallique et une en plastique) puis soufflée à l'air.

Les poudres récupérées sont stockées dans des tubes en plastique portant les numéros de cerne notés de la moelle vers l'écorce (figure 3.25.b). Après la phase d'obtention des poudres de bois, on procède à leur micro-pesées dans des capsules en aluminium (figure 3.25.c). La quantité de poudre nécessaire est fonction des isotopes à déterminer. 5 mg de poudre de bois ont été utilisés pour les isotopes de carbone 13 ($^{13}C/^{12}C$).

(a)

(b)

(c)

Figure 3.25. (a) Processus de ponçage de bois ; (b) Poudre récupérée après le ponçage ; (c) Micro pesée.

Le nombre total d'arbres qui ont fait l'objet de cette étude de caractérisation des propriétés du bois en fonction de la croissance est donné dans le tableau 3.5 ci-dessous.

Tableau 3.5. Nombre total d'arbres pour la caractérisation du bois en fonction de la croissance.

Provenances	Zone sahélienne tchadienne		Zone soudanienne tchadienne	
Essences	*F.albida*	*B.aegyptiaca*	*F.albida*	*B.aegyptiaca*
Microdensitométrie	1	1	1	1
Micromécanique	1	1	-	-
Rapport isotopique	1	1	1	1

3.3.2.2 Déroulement des expérimentations

3.3.2.2.1 Analyse des cernes par microdensitométrie

L'analyse microdensitométrique a été réalisée sur des barrettes radiales de 2 mm d'épaisseur selon la direction longitudinale, selon la méthodologie décrite par Polge (1972). L'appareil utilisé est un multi-scanner Itrax (figure 3.26.a). Son principe de fonctionnement consiste à mesurer l'atténuation des rayons X traversant l'échantillon de bois d'épaisseur uniforme. Les éprouvettes d'analyses sont des plaquettes radiales de 2 mm d'épaisseur et de largeur 15 mm dont le processus d'obtention a été décrit précédemment (paragraphe 3.3.2.1.1).

L’analyse débute par une phase préparatoire qui consiste à placer les éprouvettes sur le porte-échantillons (figure 3.26.b), puis à les numériser à l’aide d’un scanner ordinaire relié à un ordinateur de contrôle (figure 3.26.c). L’image obtenue par le scanner est importée dans le logiciel de pilotage du scanner Itrax, et va servir à déterminer la position de chaque éprouvette.

On introduit le porte-échantillon dans le multi-scanner Itrax, on rentre manuellement les valeurs de la position, de la masse, de l’épaisseur des éprouvettes dans le logiciel de pilotage, et on lance l’analyse. Le porte-échantillon est animée par un mouvement de translation, il se déplace lentement devant le faisceau lumineux du rayon X (tube Hamamatsu L9181-02 réglé à 40 kV et 300 µA). Les images radiographiques obtenues pendant le passage des éprouvettes aux rayons X sont enregistrées par un détecteur plan (Varian Paxscan 4030R, surface de 3200 x 2304 pixels, 127 µ / pixel) avec un grossissement permettant d'obtenir une résolution finale de 70 à 80 µ / pixel. Les niveaux de gris obtenus sur ces images dépendent de l’approximation de la quantité de matière traversée par le rayonnement X, donc du produit de la densité par l'épaisseur. L'épaisseur de chaque éprouvette est mesurée au pied à coulisse. La calibration en densité du bois est effectuée à l'aide d'une cale présentant des paliers d'épaisseurs fixe et d’une rampe d'épaisseur variable, usinée dans un matériau homogène de composition atomique proche du bois (kemetal). La calibration spatiale a été effectuée avec la même éprouvette dont les dimensions sont connues.

L’image radiographique de chaque éprouvette est par la suite analysée avec le programme Cerd (Mothe et *al.*, 1998). Ce logiciel permet de pointer manuellement les limites de cerne lorsque des marqueurs de croissance sont visibles. Les données générées par le logiciel sont : la largeur moyenne des cernes, la largeur du bois initial et final, la densité moyenne, la densité du bois initial...

(a)

(b)

(c)

Figure 3.26. (a) Multi-scanner Itrax ; (b) Porte échantillons ; (c) Numérisation des éprouvettes.

3.3.2.2.2 Micromécanique

Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes de dimension maximale 45x2x2 mm^3, la dimension minimale est fonction de la largeur des cernes. Le dispositif expérimental utilisé est un micro-banc d'essai de flexion trois points piloté par le logiciel Deben Microtest V6.1.83 (figure 3.27).

Les étapes de déroulement des essais sont les suivantes :

- Mise en position de l'éprouvettes

- Saisie des paramètres : longueur, largeur, hauteur des éprouvettes ; vitesse de réalisation de l'essai (0,15 mm/s).

- Mise en contact des appuis sur l'éprouvette suivi de trois cycles automatiques de charge-décharge dans le domaine élastique du matériau.

- Montée en charge jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

Figure 3.27. Micro-banc de test Deben.

Le logiciel Deben Microtest V6.1.83 enregistre le déplacement de la traverse et la force appliquée à l'échantillon (figure 3.28). Ces données sont ensuite traitées par un code Matlab développé à l'UMR PIAF. A partir des données enregistrées, on obtient le module d'élasticité longitudinal et la contrainte de rupture en flexion.

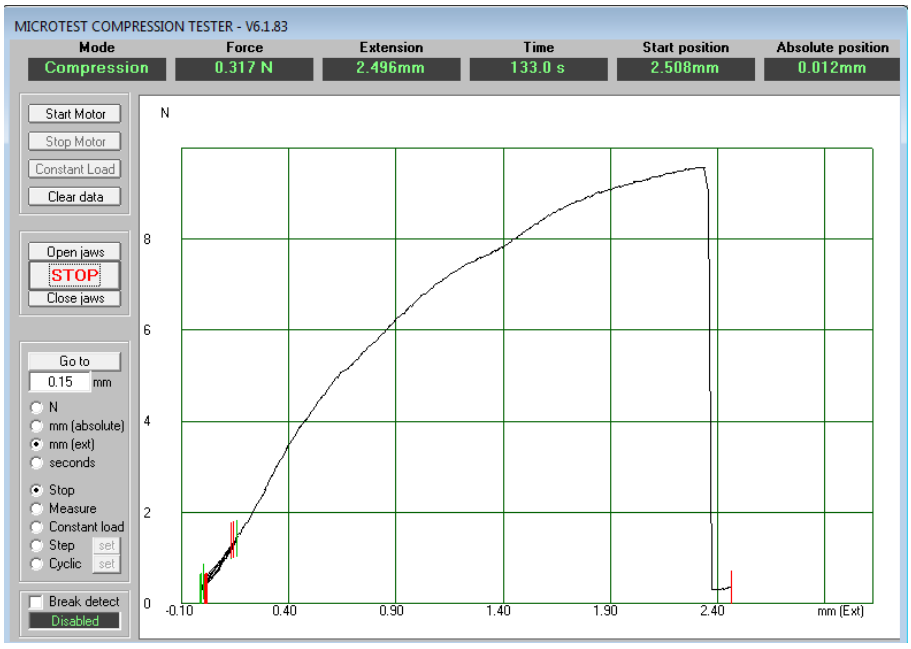


Figure 3.28. Courbe de force en fonction du déplacement.

3.3.2.2.3 Analyse isotopique des cernes de croissance

Cette analyse a consisté à déterminer la composition isotopique de carbone 13 ($\delta^{13}C$) des cernes de bois. Les échantillons utilisés sont les poudres de cernes de bois donc le processus d'obtention a été décrit dans le paragraphe 3.3.2.1.3. L'analyse se fait à l'aide d'un analyseur élémentaire, couplé en mode dynamique à un spectromètre de masse à rapport isotopique. Le principe d'analyse consiste à brûler l'échantillon dans l'analyseur élémentaire, les gaz libérés sont analysés par le spectromètre de masse isotopique.

3.4 Méthodes statistiques

Les résultats des différents essais réalisés dans le cadre de notre étude ont été traités à l'aide du logiciel XLSTAT-2021.2.2.

Pour les mesures conventionnelles sur des éprouvettes normalisées, deux outils statistiques ont été utilisés. Le premier correspond à l'analyse descriptive (moyenne, écart-type, coefficient de variation) dont le but est d'avoir aperçu général des résultats. Le second est un test non paramétrique de Kruskal-Wallis utilisé pour la comparaison des données entre les provenances. Il s'agit d'un test utilisé comme alternative à l'ANOVA pour un échantillonnage de petite taille afin de vérifier l'hypothèse selon laquelle la distribution des données est la même pour plusieurs groupes. Le principe d'interprétation de résultats consiste à comparer la p-value au seuil de signification alpha (alpha = 0,05 pour notre étude). Si la p-value est supérieur à alpha, on peut conclure que les échantillons sont issus d'une même population ; en cas contraire, les échantillons sont considérés comme provenant de populations différentes.

Les résultats de ces tests ont été associés à une représentation graphique des distributions sous forme de box plots.

Pour les résultats de caractérisation des bois en fonction de leur croissance, en plus des statistiques descriptives, nous avons effectué un test d'autocorrélation d'ordre 1 afin de connaitre l'influence des conditions environnementales de croissance de l'année n sur l'année n + 1, un test d'intercorrélation pour déterminer s'il existe une relation entre deux séries chronologiques, une régression linéaire entre les variables prises deux à deux, et un test U de Mann-Whitney pour comparer les résultats de croissance moyenne et de $\delta^{13}C$ moyen entre les provenances.

.

4 Résultats et discussion

4.1 Caractéristiques conventionnelles du bois

Ce sous-chapitre présente les résultats des analyses conventionnelles réalisées sur des éprouvettes normalisées, et des variations des caractéristiques étudiées sur les zones climatiques retenues.

Une partie de ces résultats a déjà fait l'objet de deux publications scientifiques publiés dans les journaux ***Bois et Forêts de Tropiques*** d'une part, et ***Wood Material Science and Engineering*** d'autre part. Le premier s'intitule « Variations des caractéristiques physiques et mécaniques du bois de *Balanites aegyptiaca* en fonction de trois provenances », et le second « Influence of Sahelian and Sudanian provenances on the physical and mechanical properties of *Faidherbia albida* wood from Chad » (***publications jointes en fin du document***).

4.1.1 Statistiques descriptives et effets des provenances sur les propriétés étudiées

4.1.1.1 *Balanites aegyptiaca*

Le tableau 4.1 ci-dessous présente les statistiques descriptives des propriétés physiques et mécaniques, et des constituants chimiques de *Balanites aegyptiaca* pour les trois provenances d'étude (zone sahélienne tchadienne, zone soudanienne tchadienne, zone sahélienne sénégalaise). Le nombre d'échantillons testés par caractéristique est indiqué dans les tableaux 3.2 et 3.3.

Tableau 4.1. Statistique descriptive des propriétés physiques et mécaniques, et des constituants chimiques de *Balanites aegyptiaca.*

	Résultats pour les trois provenances regroupées			Tchad Zone soudanienne			Tchad Zone sahélienne			Sénégal Zone sahélienne		
Propriétés physiques												
	Moy	ET	CV	Moy	ET	CV	Moy	ET	CV	Moy	ET	CV
Rr(%)	4,0	0,9	23,1	3,3	0,9	26,4	3,5	0,3	8,2	4,5	0,8	18,1
Rt(%)	8,5	0,9	10,7	9,3	0,4	4,8	8,1	0,7	8,4	8,3	0,9	11,1
Rv(%)	12,4	1,1	9,0	12,5	0,9	7,5	11,7	0,8	6,6	12,7	1,2	9,4
Anis	2,2	0,4	17,8	2,6	0,4	16,4	2,4	0,2	10,5	2,0	0,3	13,8
PSF (%)	24,0	1,5	6,4	24,5	1,6	6,7	22,7	0,7	3,0	24,2	1,6	6,8
ID (kg/m^3)	652	44	6,8	655	28	4,3	646	10	1,6	653	56	8,6
Mv (kg/m^3)	797	41	5,2	814	22	2,7	784	10	1,3	793	60	7,6
Propriétés mécaniques												
C12 (MPa)	49,4	6,8	13,7	40,9	5,0	12,3	50,1	1,9	3,8	52,0	6,1	11,8
F12 (MPa)	104,5	13	12,4	100,1	17,1	17,1	100,7	5,0	4,9	110,1	11,7	10,7
E12 (MPa)	10 473	1 682	16,1	9 182	1 650	18,0	11 493	722	6,3	10 897	1 534	14,1
MS (Mm²/s²)	13,3	2,6	19,9	11,5	2	17,8	14,7	2,1	14	13,6	2,8	20,5

Constituants chimiques												
Ext (%)	9,7	1,8	19	9,9	1,8	18,0	9,8	2,1	21,9	8,6	0,2	2,9
Lig (%)	21,5	2,5	11,6	19,9	1,5	7,5	23,7	1,6	6,9	19,21	0,4	2,2
Hémi (%)	31,9	2,4	7,5	30,1	0,9	4,8	34,1	1,8	5,3	30,5	0,4	3,2
Cel (%)	32,0	1,4	4,5	32,2	1,5	2,9	31,4	1,2	4,0	33,2	1,1	1,5

Moy : Moyenne ; ET : écart-type ; CV : Coefficient de variation ; Rr : retrait radial total ; Rt : retrait tangentiel total ; Rv : retrait volumique total ; Anis : anisotropie de retrait ; PSF : point de saturation des fibres ; ID : infradensité ; Mv : masse volumique à 12 % ; C_{12} : contrainte de rupture en compression longitudinale à 12 % d'humidité; F_{12} : contrainte de rupture en flexion statique à 12 % d'humidité ; E_{12} : module d'élasticité longitudinal à 12 % d'humidité ; MS : module spécifique à 12 % d'humidité ; Ext : taux d'extractibles ; Lig : taux de lignine ; Hémi : taux d'hémicelluloses ; Cel : taux de cellulose.

4.1.1.1.1 Résultats généraux

Les échantillons ont été prélevés sur des sites géographiquement différents associés à des conditions de croissance très différentes, ce qui explique la forte dispersion des résultats, associée à un coefficient de variation élevé. Les résultats présentés dans le tableau 4.1 montrent que :

. Pour les 3 provenances confondues, le retrait radial total et le retrait tangentiel total ont une moyenne respective de 4 % et 8,5 %, avec une dispersion des résultats plus de deux fois plus élevée pour le retrait radial que pour le retrait tangentiel (coefficient de variation respectivement de 23,1 % et 10,4 %).

. Le retrait volumique total est de 12,4 % avec une dispersion des résultats de l'ordre de grandeur de celle du retrait radial (coefficient de variation de 9 %).

. L'anisotropie de retrait moyenne est de 2,2 avec un coefficient de variation de 17,8 %, soit une dispersion élevée liée à celle du retrait radial.

. Le point de saturation des fibres moyen est de 24 %, avec un faible coefficient de variation (6,4 %) bien que ces résultats portent sur les trois provenances regroupées.

. L'infradensité et la masse volumique ont des moyennes respectives de 652 kg/m^3 et 797 kg/m^3, avec une faible dispersion des résultats (coefficient de variation respectivement de 6,8 % et 5,2 %) ceci bien que, comme pour le PSF, ces résultats portent sur les trois provenances regroupées.

. Les contraintes de rupture en compression et en flexion statique, et le module d'élasticité longitudinal ont des moyennes respectives de 49,4 MPa, 104,5 MPa et 10 473 MPa, et des coefficients de variation respectivement de 13,7 %, 12,4 % et 16,1 %, indicateurs d'une dispersion relativement élevée des résultats.

Les taux moyens d'extractibles, de lignine, d'hémicelluloses et de cellulose sont respectivement de 9,7 %, 21,5 %, 31,9 % et 32 % avec une dispersion élevée pour les extractibles (coefficient de variation de 19 %), moyenne pour la lignine (coefficient de variation de 11,6 %), et faible pour les hémicelluloses et la cellulose (coefficient de variation respectivement de 7,5 % et 4,5 %).

4.1.1.1.2 Influence des provenances sur les propriétés étudiées

L'influence des provenances sur les propriétés étudiées (figure 4.1) a été analysée en effectuant un test non paramétrique de Kruskal-Wallis.

Les résultats de ces tests ont été associés à une représentation graphique des distributions sous forme de box plots.

La figure 4.1 montre ainsi que :

* Le retrait radial total est significativement plus élevé dans la zone sahélienne sénégalaise (4,5 %) que dans les deux provenances tchadiennes (3,5 % en zone sahélienne et 3,3 % en zone soudanienne) avec un $p < 0,0001$ (figure 4.1a). La différence entre les deux provenances tchadiennes est non significative ($p = 0,776$).

* La différence de retrait tangentiel entre les zones sahéliennes tchadienne et sénégalaise est non significative (figure 4.1b), mais elle est significativement plus élevée dans la zone soudanienne tchadienne que dans les deux zones sahéliennes tchadienne et sénégalaise, respectivement 9,3 % contre 8,1 % et 8,3 %.

Cette tendance est l'inverse de celle observée pour les retraits radiaux totaux en termes d'effet provenances (retrait radial total élevé associé à un faible retrait tangentiel total et réciproquement).

* On n'observe aucune différence significative de retrait volumique entre la zone soudanienne tchadienne et la zone sahélienne sénégalaise (figure 4.1c). Ce résultat est lié au mode de calcul du retrait volumique fonction des deux retraits linéaires, et à l'annulation des deux tendances inverses observées sur ces deux retraits. Les différences de retrait volumique entre les deux zones sahéliennes d'une part et les deux zones tchadiennes d'autres part sont statistiquement

significatives au seuil 5 % retenu mais peu marquées : les moyennes obtenues sont respectivement de 12,5 %, 11,7 %, 12,7 % en zone soudanienne tchadienne, sahélienne tchadienne et sahélienne sénégalaise.

* L'anisotropie de retrait est significativement plus élevée pour les deux provenances tchadiennes (zone soudanienne et zone sahélienne) que pour la zone sahélienne sénégalaise (figure 4.1d), avec des valeurs moyennes respectivement de 2,6 %, 2,4 % et 2 %. Aucune différence significative n'est observée entre les deux provenances tchadiennes.

* Le point de saturation des fibres dans la zone sahélienne tchadienne est significativement moins élevé qu'en zone soudanienne tchadienne et en zone sahélienne sénégalaise (figure 4.e), avec des valeurs moyennes respectivement de 22,7 %, 24,5 % et 24,2 %.

* Pour l'infradensité (figure 4.1f), on n'observe aucune différence significative entre les trois provenances (respectivement 655 kg/m^3 et 653 kg/m^3 pour la zone soudanienne tchadienne et la zone sahélienne sénégalaise, et 646 kg/m^3 pour la zone sahélienne tchadienne).

* Contrairement à l'infradensité, la masse volumique à 12 % est significativement plus élevée en zone soudanienne tchadienne qu'en zone sahélienne tchadienne et sénégalaise (moyenne respectivement de 814 kg/m^3, 784 kg/m^3 et 793 kg/m^3) ; aucune différence significative n'est observée entre les deux zones sahéliennes (figure 4.1g). D'un point de vue global, les résultats de masse volumique restent moins dispersés entre les trois provenances que ceux de l'infradensité. La différence de résultats observée entre la masse volumique et l'infradensité peut s'expliquer par la méthode de détermination de cette dernière caractéristique. En effet, pour déterminer le volume saturé, les éprouvettes ont été immergées dans l'eau pendant trois jours, et elles ont subi trois cycles de vide et pression. Durant cette phase de saturation, une certaine quantité d'extractibles a été libérée dans l'eau ce qui doit logiquement impacter le résultat de la masse anhydre donc de l'infradensité.

* Des trois caractéristiques mécaniques étudiées, la contrainte de rupture en compression (figure 4.1h) et le module d'élasticité longitudinal (figure 4.1j) présentent la même tendance de variation : les valeurs obtenues en zone soudanienne tchadienne sont significativement moins élevées que celles de la zone sahélienne tchadienne et sénégalaise.

Pour la contrainte de rupture en flexion (figure 4.1i), aucune différence marquée n'est observée entre les trois provenances même si la différence entre les deux provenances sahéliennes est statistiquement (peu) significative.

Les moyennes respectives pour la zone soudanienne tchadienne, la zone sahélienne tchadienne et la zone sahélienne sénégalaise sont 40,9 MPa, 50,1 MPa et 52 MPa pour la contrainte de rupture en compression, 100,1 MPa, 100,7 MPa et 110,1 MPa pour la contrainte de rupture en flexion, et 9 182 MPa, 11 493, et 10 897 MPa pour le module d'élasticité longitudinal.

La tendance observée lorsque l'on compare les trois provenances pour les trois caractéristiques mécaniques est l'inverse de celle observée pour la masse volumique et l'infradensité : on constate que dans la zone d'étude où l'infradensité et surtout la masse volumique sont les plus élevées (Tchad zone soudanienne), le module d'élasticité longitudinal et les contraintes de rupture en flexion et en compression sont les plus faibles ce qui est contraire aux tendances observées en général.

Nous avons émis l'hypothèse que ce résultat pouvait être lié à un taux très variable d'extractibles dans le bois de *Balanites aegyptiaca* en fonction de la provenance.

Le taux d'extractibles a donc été déterminé sur des échantillons des trois provenances (figure 4.1l). Aucune différence significative n'a été mis en évidence entre ces trois provenances pour cette caractéristique, même si on observe des différences importantes de dispersions des valeurs obtenues : pour les zones tchadienne soudanienne, tchadienne sahélienne et sénégalaise sahélienne, le taux d'extractibles est respectivement égal à 9,9 %, 9,8 % et 8,6 % mais avec des coefficients de variations respectivement de 18 %, 21,9 % et 2,9 % (forte dispersion pour la zone sahélienne tchadienne).

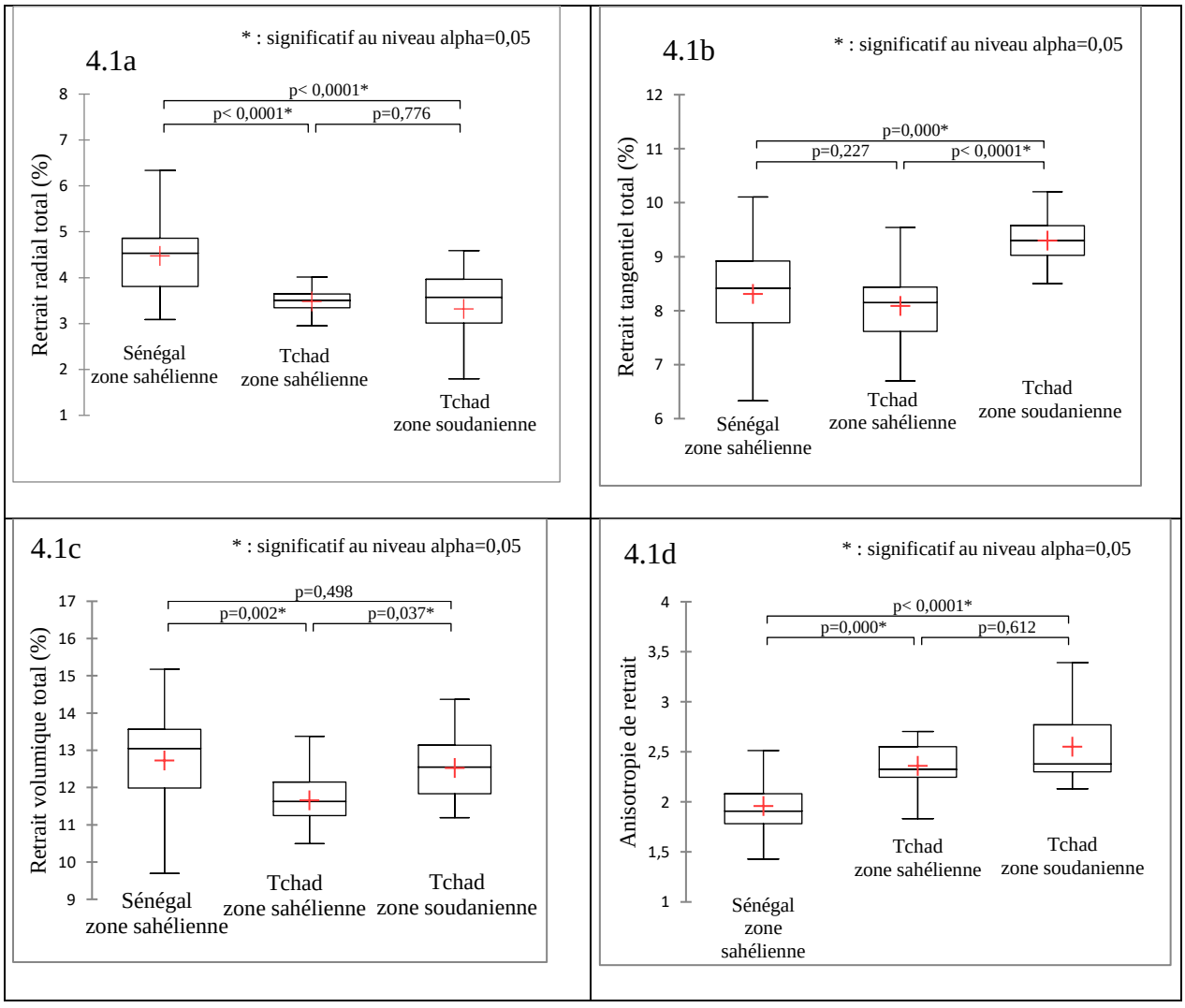
Les différences de variabilité du taux d'extractibles sont donc davantage marquées à l'intérieur de chacune des trois zones qu'entre les trois zones. Ce résultat conforte par ailleurs le fait que le taux d'extractibles est très généralement lié à un effet arbre plus qu'à un effet environnement. Au-delà de l'étude de l'effet provenance sur cette caractéristique, l'analyse des constituants des extractibles est présentée dans la section 4.1.2 du chapitre.

* Les variations du module spécifique, rapport entre le module d'élasticité longitudinal et la masse volumique, ont été analysées (figure 4.1k) car cette variable traduit souvent une adaptation aux conditions de croissance (Thibaut, 2016). Quelle que soit la provenance, les modules spécifiques moyens obtenus apparaissent très faibles pour les arbres échantillonnés : 11,5 Mm^2/s^2 en zone tchadienne soudanienne, 14,7 Mm^2/s^2 en zone tchadienne sahélienne et 13,6 Mm^2/s^2 en zone sahélienne sénégalaise. Ces faibles valeurs sont bien indicatrices d'arbres de savane (arbres courts et peu élancés). Pour comparaison, sur 3 110 séries d'essais physiques et mécaniques de la base de données Bois du Cirad correspondant à la caractérisation de plus

de 1 000 espèces, seules 191 sont associées à un module spécifique inférieur à 15 Mm²/s², soit 6 % des essais. Le module spécifique moyen dans cette base de données est de 21,5 Mm²/s².

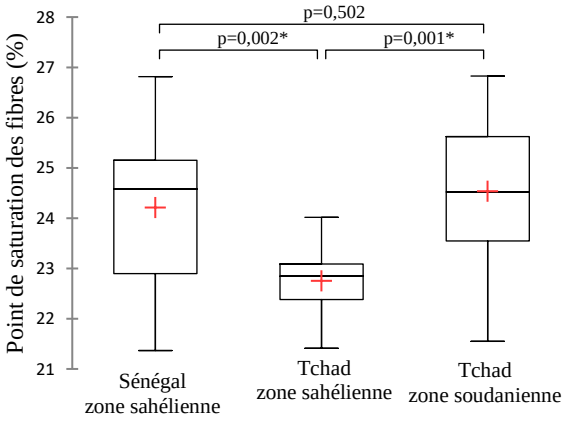
* Le taux de lignine et le taux d'hémicelluloses (figures 4.1m et 4.1n) sont significativement plus élevés en zone sahélienne tchadienne qu'en zone soudanienne tchadienne et en zone sahélienne sénégalaise avec des moyennes respectivement de 23,7 % contre 19,9 % et 19,21 % pour le taux de lignine, et 34,1 % contre 30,1 % et 30,5 % pour le taux d'hémicelluloses.

Nous avions vu précédemment qu'aucune différence significative n'est observée entre les provenances pour les taux d'extractibles (figure 4.1l). La figure 4.1o montre qu'il en est de même pour le taux de cellulose (respectivement 32,2 %, 31,4 % et 33,2 % pour les zones soudanaise tchadienne, sahélienne tchadienne et sahélienne sénégalaise).

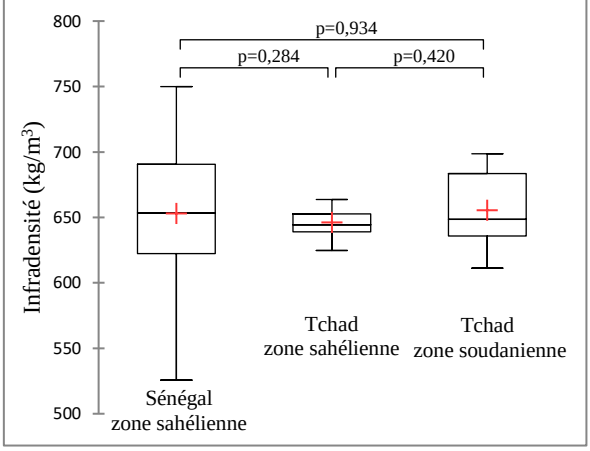


4.1e

* : significatif au niveau alpha=0,05

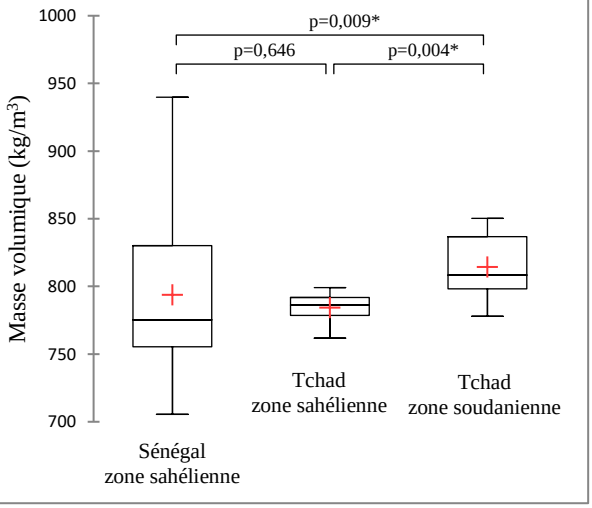


4.1f



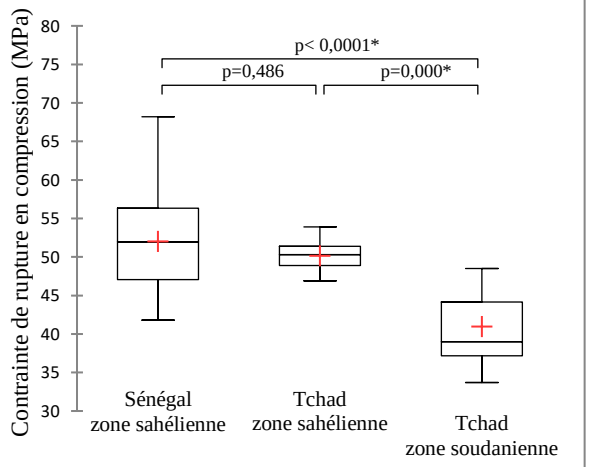
4.1g

* : significatif au niveau alpha=0,05

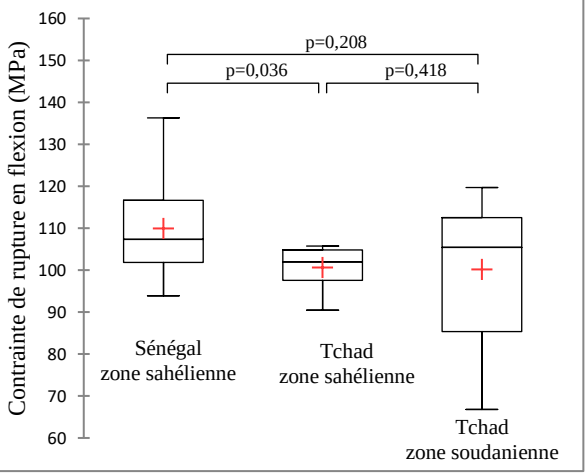


4.1h

* : significatif au niveau alpha=0,05

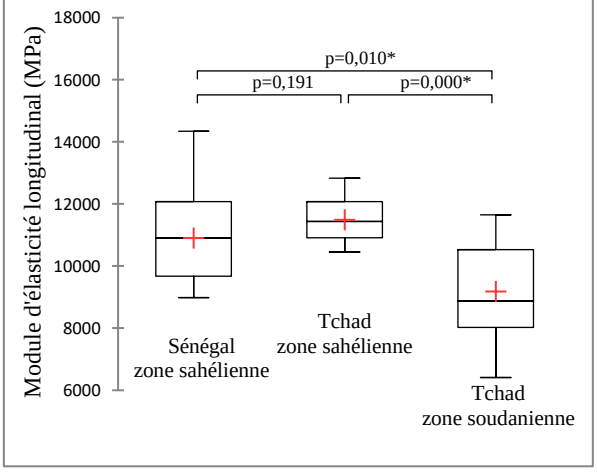


4.1i



4.1j

* : significatif au niveau alpha=0,05



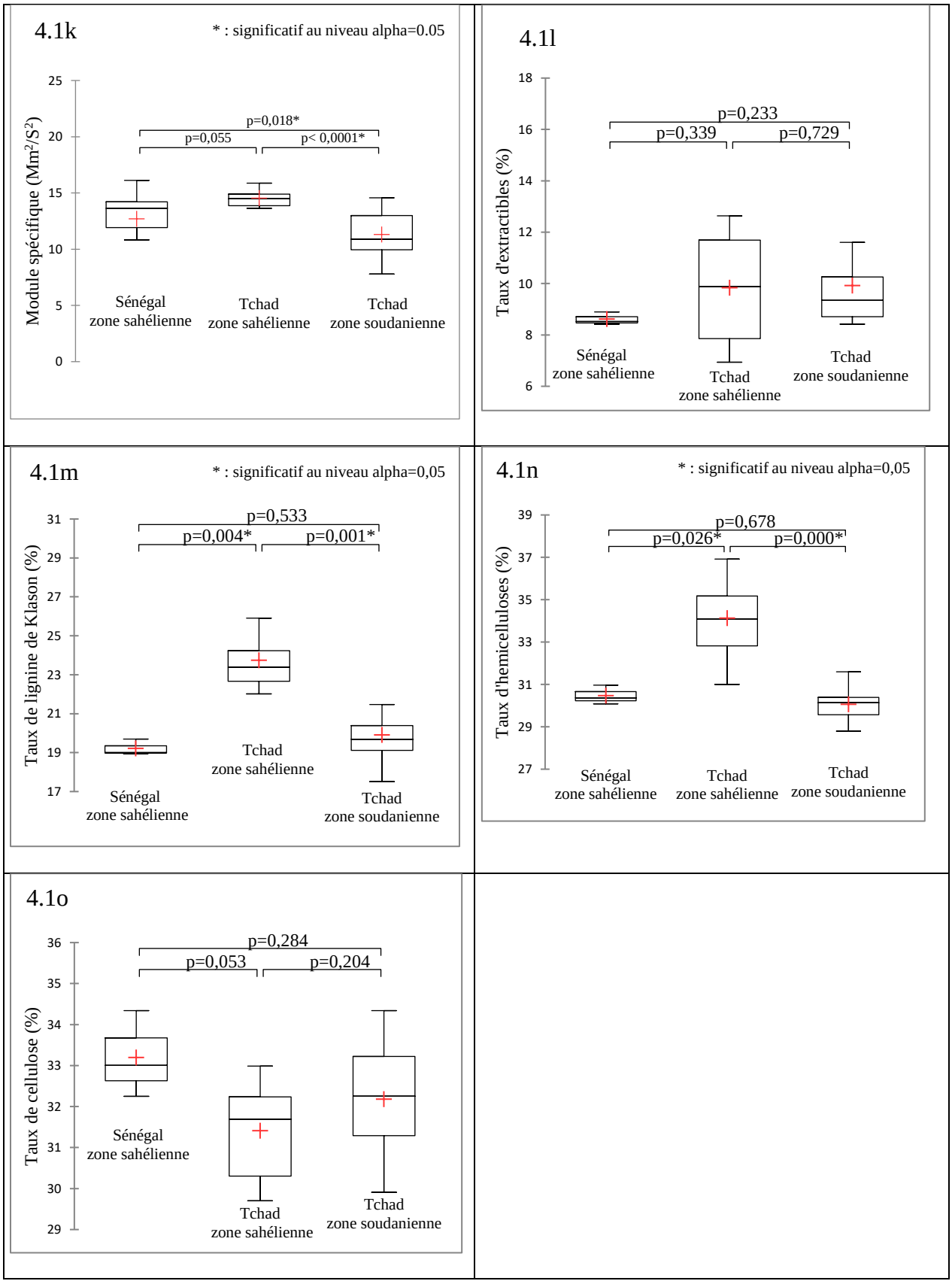


Figure 4.1. Distributions des caractéristiques du bois de *Balanites aegyptiaca* en fonction de la provenance.

4.1.1.1.3 Qualification des bois de *Balanites aegyptiaca* étudiés par rapport à d'autres provenances

En se référant aux grilles de qualification des bois proposées par Guibal *et al*. (2015) et Gérard *et al.* (2016), le bois de *Balanites aegyptiaca* apparait comme un bois mi-lourd (masse volumique moyenne voisine de 800 kg/m^3) avec une stabilité dimensionnelle moyenne : l'anisotropie de retrait est supérieure à 2 (2,2), le retrait radial total et le retrait tangentiel total sont moyens, respectivement égaux à 4 % et 8,5 %.

Le bois de *Balanites aegyptiaca* présente des contraintes de rupture en compression et en flexion moyennes, respectivement de 49,4 MPa et 104,5 MPa, et un module d'élasticité longitudinal faible (10473 MPa). Le module spécifique moyen est très faible (13,1 Mm²/s²), ce qui est caractéristique d'arbres de savane.

Les caractéristiques physiques et mécaniques du bois de *Balanites aegyptiaca* ont été très peu étudiées, l'essentiel des travaux sur les utilisations de cette espèce ayant porté sur les produits forestiers non ligneux.

Trois sources de comparaison à nos résultats ont été identifiées : Mohammed (2019), Weber et Montes (2010), et Langbour *et al.* (2019). Pour les deux dernières études, les seules données disponibles concernent la masse volumique. Le tableau 4.2 ci-après reprend les résultats de ces comparaisons uniquement pour les deux premières sources, la troisième correspondant à des résultats particuliers correspondant à une mesure sur une seule plaquette de bois.

Tableau 4.2. Comparaison des résultats obtenus sur les provenances Tchad et Sénégal par rapport à des provenances Soudan et Niger (* : Mohammed 2019 ; ** : Weber et Montes 2010).

	Tchad	**Sénégal**	**Soudan***	**Niger****
Nombre d'échantillons	7	6	15	138
Retrait radial total (%)	3,4	4,5	5,6	
Retrait tangentiel total (%)	8,7	8,3	11,5	
Masse volumique (kg/m^3)	799	793	780	627,2
Module d'élasticité longitudinal (MPa)	10 337	10 897	8 813	
Contrainte de rupture en compression (MPa)	45,5	52	47,5	
Contrainte de rupture en flexion (MPa)	100,4	110,1	107,1	

Pour les bois du Soudan (Mohammed, 2019), les résultats obtenus sont du même ordre de grandeur que ceux des bois prélevés au Tchad et au Sénégal pour la masse volumique (780 kg/m^3 contre 799 kg/m^3 et 793 kg/m^3 respectivement pour les bois du Tchad et du Sénégal), la contrainte de rupture en compression (47,5 MPa contre respectivement 45,5 MPa et 52 MPa) et la contrainte de rupture en flexion statique (107,1 MPa contre respectivement 100,4 et 110,1 MPa). Ces mesures ont été effectuées à des taux d'humidité différents : bois stabilisés à 20 °C et 65 % d'humidité relative pour les provenances Tchad et Sénégal, et annoncés stabilisés à 7 % pour la provenance Soudan. Cependant, l'impact de cette différence de taux d'humidité de stabilisation sur les résultats reste négligeable.

En revanche, on observe pour la provenance Soudan un module d'élasticité longitudinal plus faible (8 813 MPa contre respectivement 10 337 MPa et 10 897 MPa) et des retraits de séchage plus élevés (5,6 % contre 3,4 % et 4,5 % pour le retrait radial, 11,5 % contre 8,7 % et 8,3 % pour le retrait tangentiel).

Par rapport aux bois étudiés au Tchad et au Sénégal, les bois du Soudan apparaissent donc moins stables et présentent une moins bonne rigidité.

Pour 11 provenances nigériennes, Weber et Montes (2010) ont obtenu une densité moyenne de 627,2 kg/m^3, inférieure aux résultats obtenus sur les bois du Tchad, du Sénégal et du Soudan.

Pour cette même caractéristique, les résultats de Langbour *et al.* (2019) sont de 630 kg/m^3 et 860 kg/m^3 pour deux provenances du Sénégal, 780 kg/m^3 et 820 kg/m^3 pour deux provenances du Niger, 840 kg/m^3 pour une provenance du Maroc et 760 kg/m^3 pour une provenance du Burkina Faso (on rappelle que chaque résultat correspond à une mesure sur une seule plaquette de bois). La masse volumique du bois de *B. aegyptiaca* apparaît donc éminemment variable en fonction de sa provenance.

4.1.1.2 *Faidherbia albida*

Le tableau 4.3 ci-dessous présente les statistiques descriptives des propriétés physiques et mécaniques, et des constituants chimiques de *Faidherbia albida* pour les trois provenances d'étude (zone sahélienne tchadienne, zone soudanienne tchadienne, zone sahélienne sénégalaise). Le nombre d'échantillons testés par caractéristique est indiqué dans les tableaux 3.2 et 3.3.

Tableau 4.3. Statistique descriptive des propriétés physiques et mécaniques, et des constituants chimiques de *Faidherbia albida*

	Résultats pour les trois provenances regroupées			Tchad Zone soudanienne			Tchad Zone sahélienne			Sénégal Zone sahélienne		
Propriétés physiques												
	Moy	ET	CV	Moy	ET	CV	Moy	ET	CV	Moy	ET	CV
Rr(%)	3,6	0,9	25,2	3,3	1,0	31,2	3,1	0,4	14,4	4,3	0,6	13,6
Rt(%)	6,5	1,9	28,7	6,3	1,4	22,0	4,6	0,6	13,5	8,1	1,3	16,1
Rv(%)	10,1	2,4	23,8	9,6	1,4	14,8	7,7	0,9	12,3	12,4	1,6	13,0
Anis	1,8	0,4	24,1	2,1	0,6	27,4	1,5	0,2	12,2	1,9	0,3	16,2
PSF (%)	26,6	2,8	10,5	28,9	2,7	9,5	23,7	1,3	5,4	27,0	1,0	3,6
ID (kg/m^3)	435	81	18,7	359	47	12,9	409	37	9,1	524	34	6,5
Mv (kg/m^3)	538	91	17,0	444	43	9,6	508	38	7,5	630	55	8,7
Propriétés mécaniques												
C12 (MPa)	27,0	8,4	31,2	19,6	3,3	16,7	23,7	3,1	13,2	36,0	5	14,8
F12 (MPa)	53,9	15,1	28,0	52,6	11,0	21,0	42,5	11,0	26,0	63,0	14,1	22,5
E12 (MPa)	6 194	2 088	33,7	4 150	884	21,3	5 555	1 449	26,1	7 950	1 521	19,1
Constituants chimiques												
Ext (%)	8,4	2,6	30,3	8,8	1,1	12,5	5,5	1,2	2,2	9,8	2,4	24,8
Lig (%)	32,9	4,1	12,4	30,5	2,9	9,5	30,8	1,7	5,5	35,2	4,2	11,9
Hémi (%)	23,4	3,6	15,6	24,3	1,2	4,8	25,6	1,4	5,5	21,8	4,5	20,5
Cel (%)	32,0	3,7	11,6	33,2	1,5	4,5	34,6	2,0	5,8	30,0	4,1	13,5

Moy : Moyenne ; ET : écart-type ; CV : Coefficient de variation ; Rr : retrait radial total ; Rt : retrait tangentiel total ; Rv : retrait volumique total ; Anis : anisotropie de retrait ; PSF : point de saturation des fibres ; ID : infradensité ; Mv : masse volumique à 12 % ; C_{12} : contrainte de rupture en compression longitudinale à 12 % d'humidité; F_{12} : contrainte de rupture en flexion statique à 12 % d'humidité ; E_{12} : module d'élasticité longitudinal à 12 % d'humidité ; Ext : taux d'extractibles ; Lig : taux de lignine ; Hémi : taux d'hémicelluloses ; Cel : taux de cellulose.

4.1.1.2.1 Résultats généraux

Comme pour *Balanites aegyptiaca*, il faut rappeler que les échantillons ont été prélevés sur des sites géographiquement différents associés à des conditions de croissance très différentes, ce qui explique la forte dispersion des résultats, associée à un coefficient de variation élevé. Les résultats présentés dans le tableau 4.3 montrent que :

- Pour les 3 provenances confondues, les moyennes du retrait radial total et du retrait tangentiel total sont respectivement de 3,6 % et 6,5 %, avec une dispersion élevée des résultats pour les deux propriétés (coefficient de variation respectivement de 25,2 % et 28,7 %).

- Le retrait volumique total est de 10,1 % avec une dispersion des résultats du même ordre de grandeur que celle du retrait radial (coefficient de variation de 23,8 %).

- L'anisotropie de retrait moyenne est de 1,8, avec un coefficient de variation de 24,1 % du même niveau que celui des deux retraits transverses.

- Le point de saturation des fibres moyen est de 26,6 %, avec un coefficient de variation peu élevé (10,5 %) bien que ces résultats portent sur les trois provenances regroupées (observation identique pour *B. aegyptiaca*).

- L'infradensité et la masse volumique ont des moyennes respectives de 435 kg/m^3 et 538 kg/m^3, avec une dispersion élevée des résultats (coefficient de variation respectivement de 18,7 % et 17 %) contrairement à ce qui avait été observé pour *B. aegyptiaca*.

- Les contraintes de rupture en compression et en flexion statique, et le module d'élasticité longitudinal présentent des moyennes respectivement de 27 MPa, 53,9 MPa et 6194 MPa, et des coefficients de variation 31,2 %, 28 % et 33,7 %, indicateurs d'une dispersion très élevée des résultats.

Les taux moyens d'extractibles, de lignine, d'hémicelluloses et de la cellulose sont respectivement de 8,4 %, 32,9 %, 23,4 %, et 32 %, avec une dispersion des résultats élevée pour le taux d'extractibles (CV = 30,3 %) et plus limitée pour les trois autres constituants (coefficient de variation respectivement de 12,4 %, 15,6 % et 11,6 %).

4.1.1.2.2 Influence des provenances sur les propriétés étudiées

Comme pour l'étude de *Balanites aegyptiaca*, l'influence des provenances sur les propriétés étudiées a été analysée en effectuant un test non paramétrique de Kruskal-Wallis, utilisé au lieu de l'ANOVA pour un échantillonnage de petite taille afin de vérifier l'hypothèse selon laquelle la distribution des données est la même pour plusieurs groupes.

Comme pour *B. aegyptiaca*, les résultats de ces tests ont été associés à une représentation graphique des distributions sous forme de box plots.

La figure 4.2 montre que :

* Le retrait radial total est significativement plus élevé dans la zone sahélienne sénégalaise (4,3 %) que dans les deux provenances tchadiennes (3,1 % en zone sahélienne et 3,3 % en zone soudanienne) avec un $p < 0,0001$ (figure 4.2a). La différence entre les deux provenances tchadiennes est non significative ($p = 0,470$).

* En revanche, le retrait tangentiel total est significativement différent entre les trois provenances (6,3 % en zone soudanienne tchadienne, 4,6 % et 8,1 % zones sahéliennes tchadienne et sénégalaise (figure 4.2b).

Pour tenter de mieux comprendre la différence de tendance de variations entre les deux provenances tchadiennes pour les deux retraits transverses (retraits radiaux significativement non différents mais retraits tangentiels significativement différents, d'environ 2 % en absolu), nous avons dans un premier temps effectué des mesures d'angles de microfibrilles sur un nombre limité d'échantillons correspondant à des valeurs extrêmes de retrait, valeurs les plus basses et valeurs les plus élevées mesurées.

Les résultats du tableau 4.4 ci-après montrent que les échantillons de la zone sahélienne présentent des angles des microfibrilles significativement plus faibles que ceux de la zone soudanienne, ces faibles valeurs étant associées aux valeurs de retrait de séchage les moins élevées. Ces résultats sont contraires à ce que l'on pouvait attendre : aussi bien chez les résineux que chez les feuillus, les retraits transversaux tendent à être corrélés négativement à l'angle des microfibrilles contrairement au retrait longitudinal. Cette mesure est plus délicate à conduire chez les feuillus que chez les résineux mais la méthodologie utilisée à l'Institut Européen des Membranes à l'aide du diffractomètre Oxford Diffraction, méthodologie robuste et éprouvée, conforte les résultats obtenus. Les différences d'angles de microfibrilles pourraient donc être liées à un effet provenance mais cela resterait à confirmer par une étude spécifique à conduire.

En revanche, le tableau montre que les écarts entre les valeurs extrêmes de retrait radial et de retrait tangentiel sont directement liés au point de saturation des fibres, caractéristique elle-même liée aux taux d'extractibles.

L'analyse des constituants des extractibles effectuée dans un second temps pour tenter d'expliquer les mêmes résultats, analyse présentée dans la section 4.1.2, montre que la présence d'acide gras dans le bois impacte les résultats des retraits. Dans les bois présentant ce type de constituant, les retrait sont plus faibles. Pour les deux provenances tchadiennes, les constituants des extractibles diffèrent d'un composé, l'acide oléique qui est un acide gras mono-saturé dont la présence n'a pas été observée dans les bois prélevés dans la zone sahélienne tchadienne. La différence des retraits observée peut donc s'expliquer par l'absence de ce composé dans les échantillons de l'une des deux zones.

Tableau 4.4. Angle des microfibrilles de *Faidherbia albida* de deux provenances tchadiennes.

Zones climatiques	N° Eprouvettes	Angle des microfibrilles (°)	Retrait radial (%)	Retrait tangentiel (%)	PSF (%)
Zone sahélienne	102	10	2,6	4	25,4
	108	14	2,6	4	24,1
	109	11	2,8	4,1	24,5
	110	11	2,7	4,7	23,6
Zone soudanienne	104	23	3,8	8	27,9
	107	22	3	6,8	25,7
	116	29	4,1	7,7	32,7
	112	20	3,7	7,6	26,3

* Comme pour le retrait tangentiel total, le retrait volumique total (figure 4.2c) est significativement différent entre les trois provenances (résultat lié au mode de calcul du retrait volumique en fonction des deux retraits linéaires) : respectivement 9,6 %, 7,7 %, et 12,4 % pour la zone soudanienne tchadienne, et les zones sahéliennes tchadienne et sénégalaise.

* L'anisotropie de retrait est significativement moins élevée dans la zone sahélienne tchadienne que dans la zone soudanienne tchadienne et la zone sahélienne sénégalaise ($p < 0,0001$), avec des moyennes respectivement de 1,5 % contre 2,1 % et 1,9 % (figure 4.2d). Ce résultat va dans le sens de ceux de Mazet et Nepveu (1991), Masseran et Mariaux (1985), et Charron *et al*. (2003) qui ont montré que l'anisotropie dépend davantage du retrait radial que du retrait tangentiel.

* Le point de saturation des fibres est significativement moins élevé dans la zone sahélienne tchadienne que dans la zone soudanienne tchadienne et la zone sahélienne sénégalaise, avec respectivement des moyennes de 23,7 % contre 28,9 % et 27 % (figure 4.2e). Cette tendance avait été observée pour *Balanites aegyptiaca*. Pour *Faidherbia albida*, ces variations vont dans le même sens que celles du taux d'extractibles.

* L'infradensité et la masse volumique (figure 4.2 f et 4.2g) sont significativement différents pour les trois provenances, diminuant de la zone sahélienne sénégalaise (resp. 524 kg/m^3 et 630 kg/m^3) à la zone sahélienne tchadienne (resp. 409 kg/m^3 et 508 kg/m^3) et à la zone soudanienne tchadienne (resp. 359 kg/m^3 et 444 kg/m^3).

* Le module d'élasticité longitudinal et de la contrainte de rupture en compression (figure 4.2j et 4.2h) varient de façon analogue à l'infradensité et à la masse volumique, diminuant de la zone sahélienne sénégalaise (resp. 7 950 MPa et 36 MPa) à la zone sahélienne tchadienne (resp. 5 555 MPa et 23,7 MPa) et à la zone soudanienne tchadienne (resp. 4 150 MPa et 19,6 MPa).

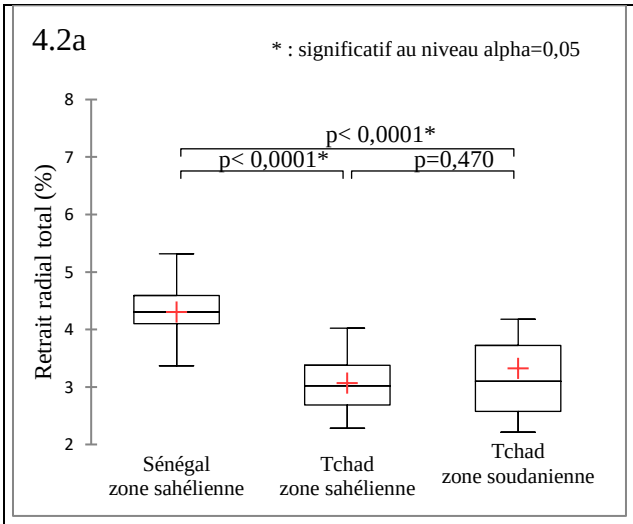
En revanche, pour la contrainte de rupture en flexion (figure 4.2i), les valeurs obtenues pour la zone soudanaise tchadienne sont supérieures à celles de la zone sahélienne tchadienne, respectivement 52,6 MPa contre 42,5 MPa. Cette caractéristique est significativement moins élevée dans ces deux zones qu'en zone sahélienne sénégalaise (63 MPa).

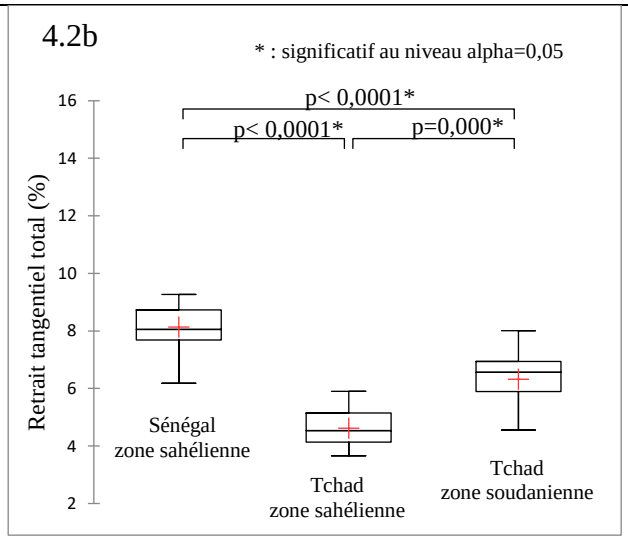
* Le module spécifique varie de façon analogue au module d'élasticité longitudinal et à la masse volumique (figure 4.2k), diminuant de la zone sahélienne sénégalaise (12,6 Mm^2/s^2) à la zone sahélienne tchadienne (10,8 Mm^2/s^2) et à la zone soudanienne tchadienne (9,3 Mm^2/s^2).

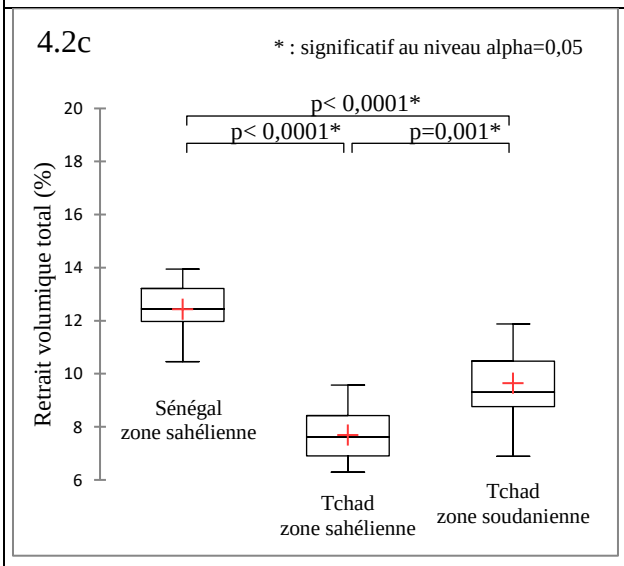
* Alors que pour *Balanites aegyptiaca*, on n'observait aucune différence de taux d'extractibles entre les trois provenances (figure 4.2l), le taux d'extractible de *Faidherbia albida* est significativement plus faible dans la zone sahélienne tchadienne que dans la zone soudanienne tchadienne et la zone sahélienne sénégalaise (moyenne respectivement de 5,5 % contre 8,8 % et 9,8 %).

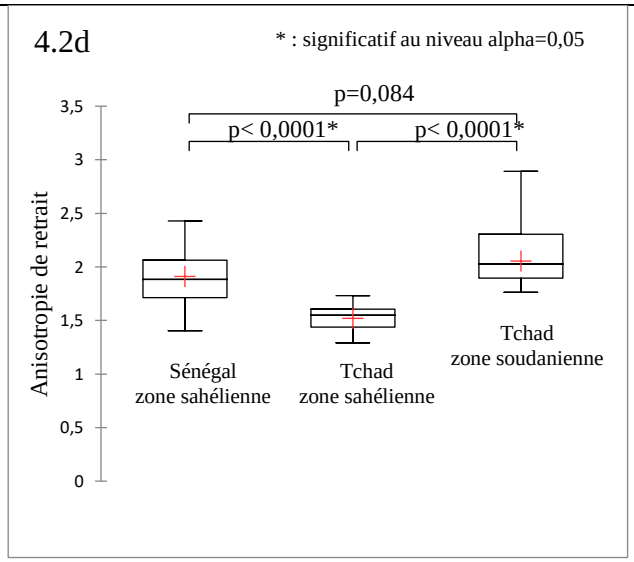
* Le taux de lignine (figure 4.2m) est significativement plus élevé dans la zone sahélienne sénégalaise que dans les zones soudanienne et sahélienne tchadienne (moyennes respectivement de 35,2 % contre 30,5 % et 30,8 %), alors que le taux de cellulose est significativement moins élevé (moyennes respectivement de 30 % contre 33,2 % et 34,6 %). Pour ces deux composants, on n'observe aucune différence significative entre les deux zones tchadiennes.

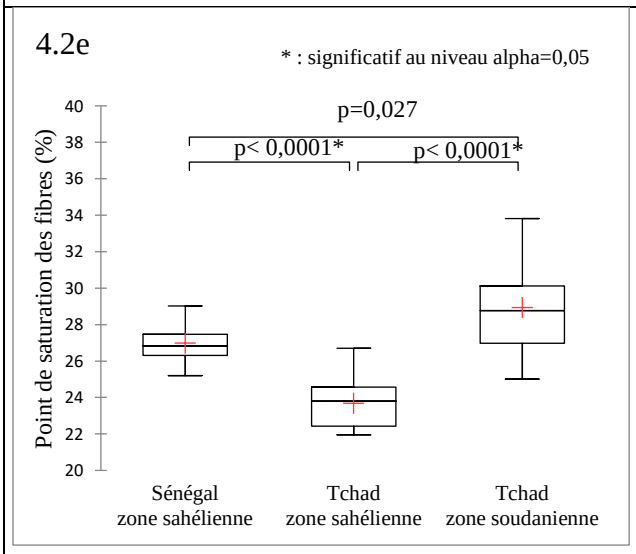
La tendance de variation du taux d'hémicelluloses est similaire à celle du taux de cellulose (figure 4.2n et 4.2o) : le taux d'hémicelluloses est significativement plus élevé dans la zone sahélienne tchadienne que dans la zone sahélienne sénégalaise (moyenne respectivement de 25,6 % et 21,8 %). On n'observe aucune différence significative entre la zone soudanienne tchadienne et les deux zones sahéliennes tchadienne et sénégalaise.

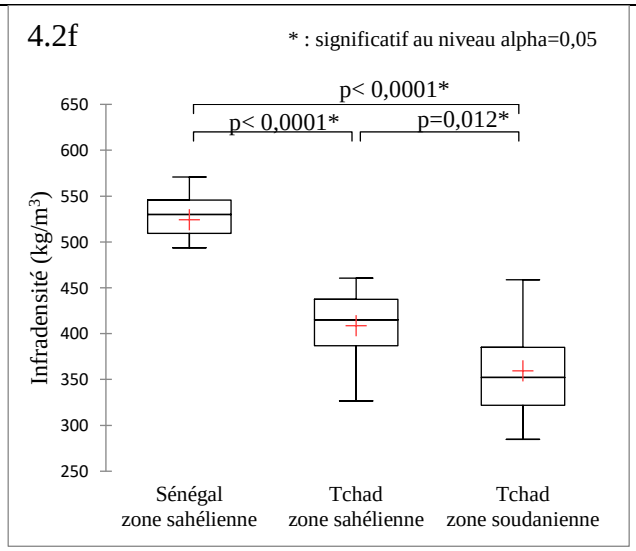

4.2a
* : significatif au niveau alpha=0,05
Retrait radial total (%)
p< 0,0001*
p< 0,0001*
p=0,470
Sénégal zone sahélienne
Tchad zone sahélienne
Tchad zone soudanienne


4.2b
* : significatif au niveau alpha=0,05
Retrait tangentiel total (%)
p< 0,0001*
p< 0,0001*
p=0,000*
Sénégal zone sahélienne
Tchad zone sahélienne
Tchad zone soudanienne


4.2c
* : significatif au niveau alpha=0,05
Retrait volumique total (%)
p< 0,0001*
p< 0,0001*
p=0,001*
Sénégal zone sahélienne
Tchad zone sahélienne
Tchad zone soudanienne

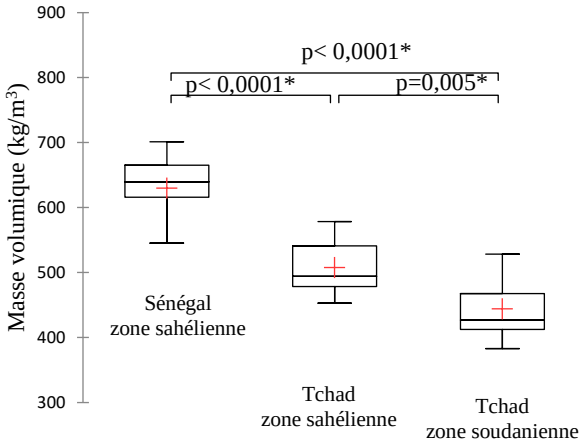

4.2d
* : significatif au niveau alpha=0,05
Anisotropie de retrait
p=0,084
p< 0,0001*
p< 0,0001*
Sénégal zone sahélienne
Tchad zone sahélienne
Tchad zone soudanienne


4.2e
* : significatif au niveau alpha=0,05
Point de saturation des fibres (%)
p=0,027
p< 0,0001*
p< 0,0001*
Sénégal zone sahélienne
Tchad zone sahélienne
Tchad zone soudanienne


4.2f
* : significatif au niveau alpha=0,05
Infradensité (kg/m3)
p< 0,0001*
p< 0,0001*
p=0,012*
Sénégal zone sahélienne
Tchad zone sahélienne
Tchad zone soudanienne

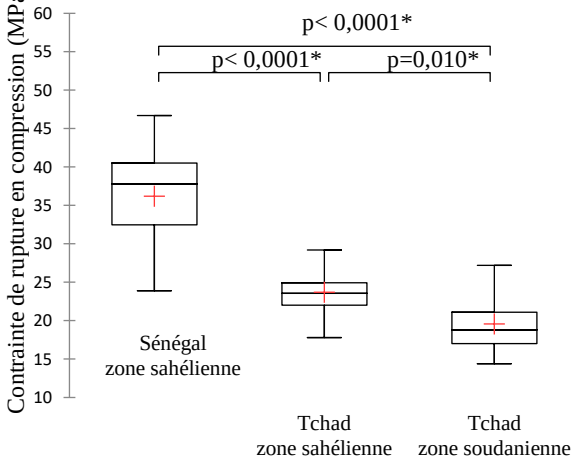
4.2g

* : significatif au niveau alpha=0,05



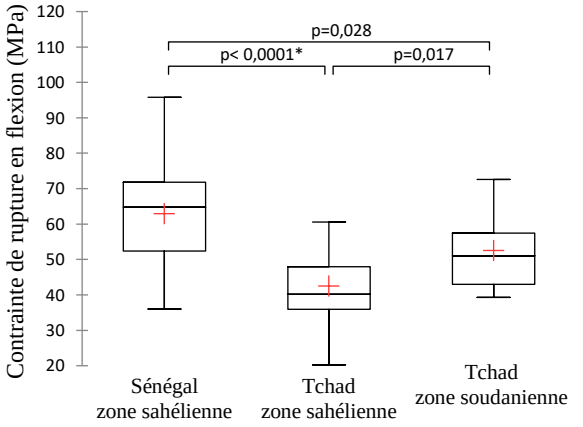
4.2h

* : significatif au niveau alpha=0,05



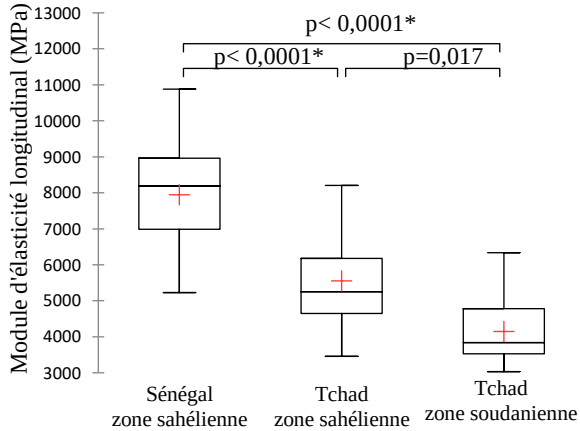
4.2i

* : significatif au niveau alpha=0,05



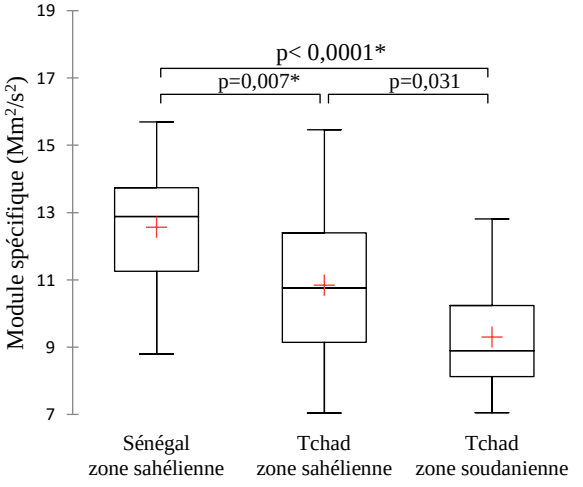
4.2j

* : significatif au niveau



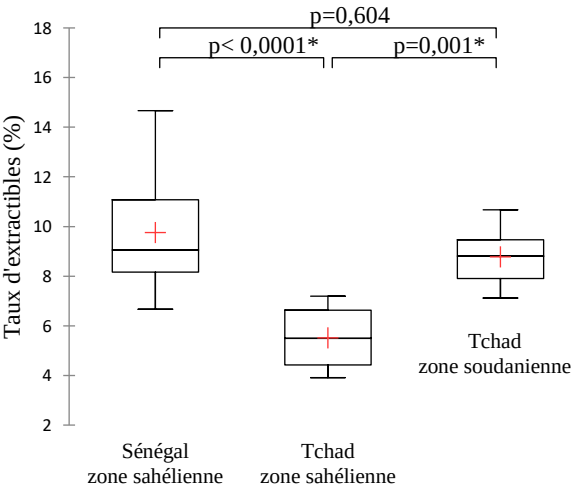
4.2k

* : significatif au niveau alpha=0,05



4.2l

* : significatif au niveau alpha=0,05



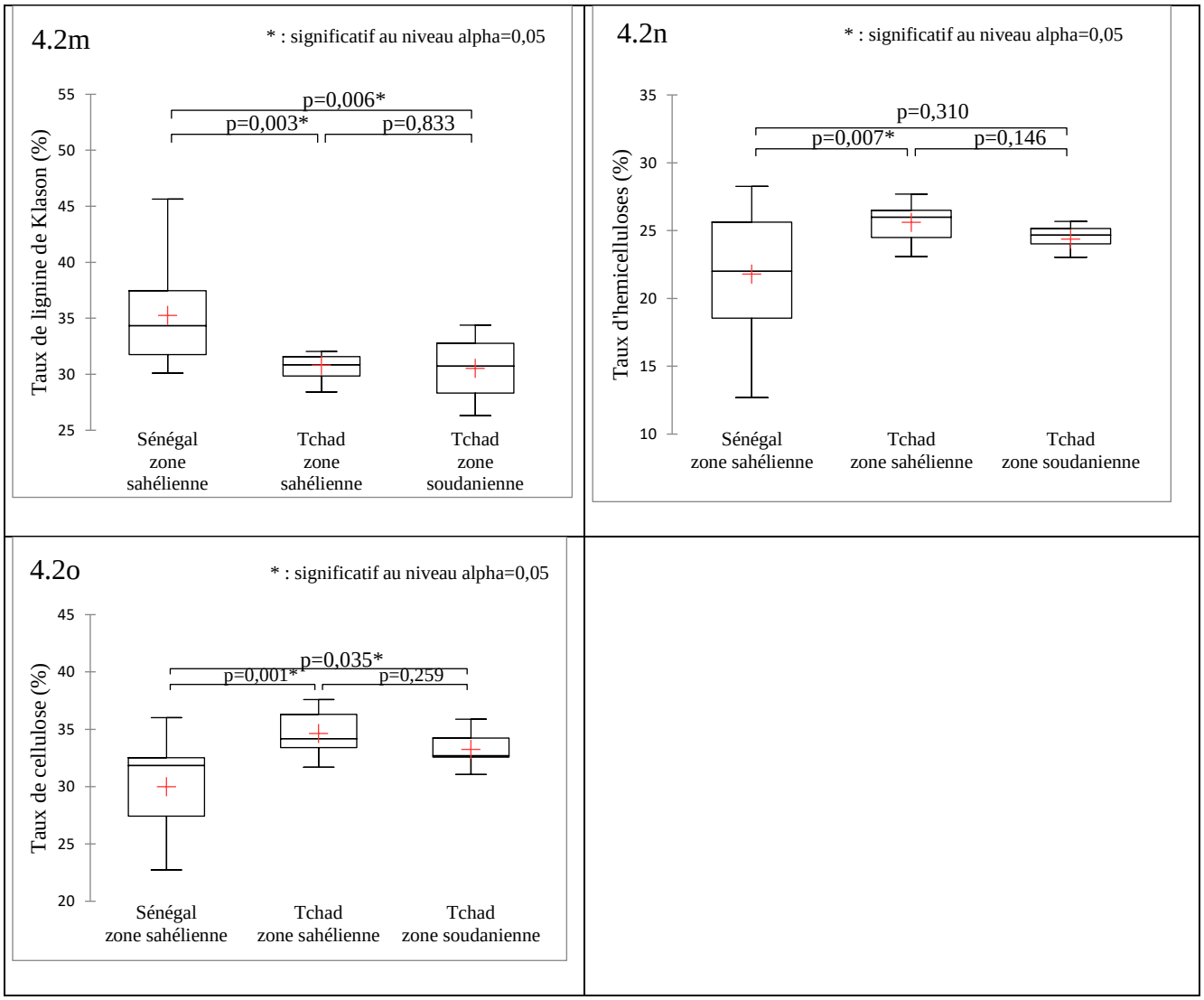


Figure 4.2. Distributions des caractéristiques du bois de *Faidherbia albida* en fonction de la provenance

4.1.1.2.3 Positionnement des bois de *Faidherbia albida* étudiés par rapport à d'autres provenances

En se référant aux grilles de qualification des bois proposées par Guibal et *al*. (2015) et Gérard *et al.* (2016), le bois de *Faidherbia albida* des deux provenances tchadienne et sénégalaise apparait comme très léger à léger (masse volumique variant de 444 kg/m^3 à 630 kg/m^3 selon les provenances) et relativement stable (anisotropie de retrait variant de 1,5 à 2,1), avec des retraits linéaires de séchage faibles à moyens (retrait radial total variant de 3,1 % à 4,3 % et retrait tangentiel total variant de 4,6 % à 8,1 %). Le point de saturation des fibres, indicateur majeur de stabilité des bois, est faible à moyen, variant de 23,7 % à 28,9 % suivant les provenances.

Les trois propriétés mécaniques étudiées sont faibles : selon les provenances, module d'élasticité longitudinal compris entre 4 150 MPa et 7 950 MPa, contrainte de rupture en flexion

comprise entre 42,5 MPa de 63 MPa, et contrainte de rupture en compression comprise entre 19,6 MPa et 36 MPa.

Pour les trois provenances, les faibles modules spécifiques obtenus, variant de 9,3 Mm^2/s^2 à 12,6 Mm^2/s^2 (moyenne : 11,2 Mm^2/s^2) sont typiquement indicateurs de bois de savanes.

Comme mentionné précédemment, les caractéristiques du bois de *Faidherbia albida* n'ont fait l'objet que de très peu d'études complètes, et la seule référence identifiée est la monographie du CTFT (1988) qui présente des résultats obtenus sur deux billes issues de deux arbres récoltés dans la région de Diourbel au Sénégal (domaine climatique sahélien).

Le tableau 4.5 ci-après permet de comparer les valeurs moyennes de nos résultats à celle de cette étude de référence.

Tableau 4.5. Comparaison des valeurs moyennes des caractéristiques de *Faidherbia albida*

	Sénégal, région de Diourbel (Monographie CTFT, 1988)	Tchad Zone soudanienne	Tchad Zone sahélienne	Sénégal Zone sahélienne
Caractéristiques physiques				
Rr(%)	4,2	3,3	3,1	4,3
Rt(%)	8,5	6,3	4,6	8,1
Rv(%)	13,1	9,6	7,7	12,4
Anis	2	2,1	1,5	1,9
PSF (%)	23	28,9	23,7	27,0
Mv (kg/m^3)	645	444	508	630
Caractéristiques mécaniques				
C12 (MPa)	45,5	19,6	23,7	36
F12 (MPa)	90,4*	52,6	42,5	63,0
E12 (MPa)	10 701*	4 150	5 555	7 950
MS (Mm^2/S^2)	16,5*	9,3	10,9	12,6

* : équivalent flexion 4 points

Pour nos trois provenances d'étude, les retraits linéaires de séchage, le retrait volumique, et l'anisotropie de retrait (excepté pour la zone soudanienne tchadienne) sont plus faibles que ceux de l'étude CTFT. En revanche, le point de saturation est plus élevé.

La masse volumique et les propriétés mécaniques obtenues pour nos trois provenances sont aussi plus faibles.

En revanche, le module spécifique obtenu pour l'étude CTFT est très supérieur à ceux de nos trois provenances ce qui indiquerait que les bois prélevés dans la région de Diourbel ne présentent pas les caractéristiques de bois de savane (aucune information n'est disponible quant à la structure du peuplement dans lequel les bois ont été prélevés).

4.1.1.3 Résultats d'études similaires conduite en région sèche sur la variation des caractéristiques du bois en fonction de la provenance

Nos résultats sur *Balanites aegyptiaca* et *Faidherbia albida* de provenance soudanienne et sahélienne peuvent être mis en regard de ceux d'études similaires conduites sur différentes espèces tropicales adaptées à des climats contrastés. Ces études mettent en évidence l'influence des provenances sur les principales propriétés du bois, mais avec des tendances variables.

Ainsi, sur *Pterocarpus erinaceus,* Segla *et al.* (2015) et Traoré (2009) ont montré une variation significative de la masse volumique, de l'infradensité, de l'anisotropie de retrait et de contrainte de rupture en compression en fonction des provenances des bois issus des zones soudanienne, guinéenne malienne et togolaise. Ces propriétés augmentent avec l'aridité de leur région d'origine, associée à des conditions de croissance plus difficiles. En revanche, aucune différence significative entre provenances n'a été observée pour le retrait radial total, le retrait tangentiel total, le point de saturation des fibres, le module d'élasticité longitudinal et la contrainte de rupture en flexion.

Sur quatre provenances de *Pinus tecunumanii* du Guatemala récoltées dans quatre départements différents, Eguiluz-Piedra et Zobel (2007) ont mis en évidence une augmentation de masse volumique d'ouest en est en relation avec une augmentation de l'aridité du climat.

Sur des Tecks indiens âgés de 21 et 65 ans, Bhat et Priya (2004) ont mis en évidence une influence significative de la provenance sur les propriétés physiques et mécaniques étudiées (masse volumique, module d'élasticité, contrainte de rupture en flexion et compression), mais suivant une tendance inverse de celle des résultats précédents : les bois de la provenance Kanara caractérisée par des conditions de croissance plus difficiles (climat plus aride) présentaient des propriétés plus basses que ceux de la provenance Malabar caractérisée par des conditions de croissance plus favorables.

Il apparait en fait difficile de comparer strictement ces tendances de variations de propriétés ; suivant les essences considérées, l'impact des conditions de croissance sur les propriétés physiques et mécaniques d'espèces tropicales adaptées à des climats contrastés apparait très variable, avec des tendances qui peuvent être totalement opposées.

4.1.2 Caractérisation des extractibles par GC-MS

A l'issue de l'étude des variations des propriétés physiques et mécaniques, et des constituants chimiques, il nous est apparu opportun d'identifier la nature des extractibles contenus dans le bois des deux espèces pour les trois provenances. Des extractions successives ont été réalisées au Soxhlet, d'abord avec un mélange solvant éthanol-toluène (1:1) puis à l'eau distillée. La méthodologie mise en œuvre est détaillée dans la section 3.3.1.5.

Le tableau 4.6 ci-après présente la nature des extractibles identifiés en chromatographie en phase gazeuse, couplée à un spectromètre de masse (GC-MS), et leur temps de rétention correspondant, par espèce et par provenance. La famille de ces composés et leurs éventuelles activités ou caractéristiques spécifiques sont données pour information. Les chromatogrammes correspondants sont donnés en annexe 2.

Tableau 4.6. Composés extractibles (ou familles de composés) identifiés dans les bois de *Faidherbia albida* et de *Balanites aegyptiaca* suivant leur provenance

Temps de rétention (en min)	**Composé chimique**	Famille	Caractéristique ou activité spécifique	***Faidherbia albida***			***Balanites aegyptiaca***		
				Tchad zone soud	Tchad zone sah.	Sénégal zone sah.	Tchad zone soud.	Tchad zone sah.	Sénégal zone sah.
13 - 17	Monosaccharides	Sucres		**X**	**X**	**X**	**X**	**X**	**X**
14 - 16	Autres inositols	Sucres (polyols)	Tensioactifs				**X**		**X**
14 - 19	Acide gras C14 à C18	Acides gras		**X**	**X**				
14,91	Pinnitol	Sucre (cyclitol)	Glucide osmoprotecteur chez les plantes				**X**	**X**	**X**
16,38	Représentatif des sesquiterpènes	Terpènes	Activités biologiques (ex : antifongique et anti-termite)				**X**		**X**
16,67	Acide palmitique	Acide gras (saturé)		**X**	**X**				
17,13	Représentatif des sesquiterpènes	Terpènes	Activités biologiques (ex : antifongique et anti-termite)				**X**		**X**
17,38	Représentatif des sesquiterpènes	Terpènes	Activités biologiques (ex : antifongique et anti-termite)				**X**		**X**

17,78	Acide oléique	Acide gras (mono-insaturé)			X				
17,78	Acide linoléique	Acide gras (poly-insaturé)		X	X				
17,93	Acide stéarique	Acide gras		X	X				
19,8 - 22,5	Disaccharides	Sucres		X	X	X			X
27,92	Dyosgenin	Dérivé de stérol	Saponine stéroïdienne = précurseur chimique de divers stéroïdes				X		X
28,04	Stigmastérol	Stérol	Activité antioxydante (résistance vis-à-vis de xylophages)	X	X	X			
28,3	Stigmastadienone	Stérol	Hydroxylation suivie de déshydratation des stérols	X	X	X			
29,11	Dérivé de cycloartenol	Stérol	Précurseur des stérols (stanol)	X	X				

Les résultats issus des analyses GC-MS (tableau 4.6 et annexe 2) montrent des différences dans les compositions chimiques des extractibles présents dans les différents bois étudiés. Les bois de *Faidherbia albida* du Tchad (zone soudanienne et zone sahélienne) semble contenir un éventail plus large de composés extractibles que ceux provenant du Sénégal, même si en termes de taux d'extractibles, les bois issus des deux zones tchadiennes ont un taux d'extraits plus faible que pour celui de la zone sénégalaise (respectivement 8,8 % et 5,5 % pour les deux zones tchadiennes contre 9,8 % pour la zone sénégalaise [taux d'extrait sur bois sec]).

Cela peut s'expliquer par le fait que pendant la GC-MS, malgré des conditions de dérivation assez sévères et longues (BSTFA à 70°C pendant 48h), il est souvent resté des insolubles dans les piluliers passés en GC-MS, et une petite partie des composés ne s'est pas évaporée. Ce phénomène est caractéristique des extraits polaires, il est probablement dû à la présence de polymères/macromolécules de type polysaccharide ou tanin.

Pour pallier ce problème, une injection en LC-MS pourrait permettre d'obtenir les profils plus fidèles à la véritable composition des extraits et peut-être davantage comparables entre eux, même si le nombre d'identifications est limité faute de bases de données.

* Les monosaccharides (13-17 min) sont les seuls extractibles communs aux deux espèces (et aux trois provenances).

* Les extractibles présents de façon caractéristique dans le bois de *Balanites aegyptiaca* sont des stéréoisomères de l'inositol (14-16 min), le pinnitol (14,91 min), le dyosgenin (27,92 min) et des sesquiterpènes (16,38 min, 17,13 min, 17,38 min, composés dominants).

* Les extractibles présents de façon caractéristique dans le bois de *Faidherbia albida* sont les suivants : acide gras C14 à C18 (14 – 19 min), acide palmitique (16,67 min), acide oléique et acide linoléique (17,78 min), acide stéarique (17,93 min), stigmastérol (28,04 min, un des dominants pour la zone sahélienne tchadienne), stigmastadienone (28,3 min), et dérivé de cycloartenol (29,11 min).

Les chromatogrammes montrent ainsi que :

* Pour *Faidherbia albida*, les extractibles dans les deux zones tchadiennes sont quasi identiques, excepté la présence d'alcool oléique pour la zone sahélienne.

* *Faidherbia albida* prélevé au Sénégal (zone sahélienne) contient moins d'extractibles que les prélèvements dans les deux zones du Tchad :

- Absence de sept composés par rapport à la zone sahélienne tchadienne : acide gras C14 à C18, acide palmitique, acide oléique et acide linoléique, acide stéarique, et dérivé de cycloarténol.

- Absence de cinq composés par rapport à la zone soudanienne tchadienne : acide gras C14 à C18, acide palmitique (dominant pour cette zone), acide linoléique, acide stéarique, et dérivé de cycloarténol.

* Les extractibles de *Balanites aegyptiaca* sont identiques pour la provenance sénégalaise sahélienne et la provenance tchadienne soudanienne, exceptés la présence de disaccharides pour la provenance sénégalaise. Pour cette même espèce, la provenance sahélienne tchadienne ne semble contenir que du pinnitol (en plus des monosaccharides).

Les différences marquées entre les extractibles des deux espèces d'une part et des trois provenances d'autre part pourraient être mises en relation avec les différences observées entre provenances et espèces pour certaines propriétés physiques et mécaniques du bois telles que les retraits de séchage, le PSF, la masse volumique et le module d'élasticité.

L'effet de chaque extractible sur ces propriétés resterait cependant à établir, en tenant compte des probables impacts conjugués de ces différents composés.

4.1.3 Conclusions sur l'étude des caractéristiques conventionnelles de *Balanites aegyptiaca* et *Faidherbia albida*

Le bois de *Balanites aegyptiaca* étudié est un bois mi-lourd qui présente des retraits transversaux moyens et un faible point de saturation. Ses propriétés mécaniques en rupture sont moyennes (compression et flexion) et il présente une faible rigidité. Son module spécifique est très faible ce qui est caractéristique d'arbres de savane.

Le bois de *Faidherbia albida* étudié est très léger à léger ; ses retraits linéaires de séchage et son point de saturation des fibres sont faibles à moyens (retrait radial total variant de 3,1 % à 4,3 % et retrait tangentiel total variant de 4,6 % à 8,1 %). Ses propriétés mécaniques en rupture (compression et flexion) et son module d'élasticité longitudinal sont faibles. Comme pour *Balanites aegyptiaca*, les faibles modules spécifiques obtenus pour les trois provenances sont typiquement indicateurs de bois de savanes.

L'étude des variations des caractéristiques conventionnelles des bois de *Balanites aegyptiaca* et *Faidherbia albida* en fonction des zones de prélèvement a mis en évidence des tendances très variables d'une essence à l'autre et selon les propriétés étudiées.

*** Variations de la masse volumique et des indicateurs de stabilité**

- Pour ***Balanites aegyptiaca***, on observe des tendances opposées, avec un retrait tangentiel significativement plus élevé en zone soudanienne tchadienne que dans les zones sahéliennes tchadienne et sénégalaise, mais un retrait radial significativement moins élevé. Aucune différence significative n'est observée entre les trois zones pour le retrait volumique alors que l'anisotropie de retrait (= retrait tangentiel / retrait radial) suit la même tendance que le retrait tangentiel.

Le point de saturation des fibres est significativement plus bas en zone sahélienne tchadienne mais globalement faible pour les trois provenances (inférieur à 25 %) ce qui est un bon indicateur de la stabilité des bois.

Comme le retrait tangentiel, la masse volumique est significativement plus élevée en zone soudanienne tchadienne que dans les deux autres zones, alors que l'on n'observe aucune différence significative entre les trois zones pour l'infradensité.

- Pour ***Faidherbia albida***, les retraits transversaux sont significativement plus élevés dans la zone sahélienne sénégalaise que dans les deux provenances tchadiennes, tandis que l'anisotropie de retrait est significativement plus élevée dans la zone soudanienne tchadienne.

Le retrait volumique total présente la même tendance de variation que les retraits transversaux.

L'infradensité et la masse volumique sont significativement différents entre les trois provenances, avec des valeurs plus élevées dans la zone sahélienne sénégalaise.

*** Variations des indicateurs de comportement mécanique**

- Pour *Balanites aegyptiaca*, la contrainte de rupture en compression et le module d'élasticité longitudinal sont moins élevés en zone soudanienne tchadienne que dans les deux autres zones. En revanche, aucune différence significative n'est observée entre les trois zones pour la contrainte de rupture en flexion statique.

- Pour *Faidherbia albida*, les trois caractéristiques mécaniques étudiées sont plus élevées en zone sahélienne sénégalaise que dans les deux autres zones.

*** Variations des constituants chimiques**

- Pour *Balanites aegyptiaca*, les taux de lignine et d'hémicellulose sont significativement plus élevés dans la zone sahélienne tchadienne. Aucune différence significative n'est observée entre les provenances pour le taux d'extractibles et le taux de cellulose.

. Pour *Faidherbia albida*, les taux d'extractibles et de lignine sont significativement plus élevés en zone sahélienne sénégalaise qu'en zone sahélienne et soudanienne tchadienne ; en revanche, les taux d'hémicellulose et de cellulose sont plus élevés dans la zone sahélienne tchadienne.

* **Les analyses GC-MS** montrent que les bois de *Faidherbia albida* des deux zones du Tchad contiennent un éventail plus large de composés extractibles que ceux provenant du Sénégal. Les monosaccharides sont les seuls extractibles communs aux deux espèces (et aux trois provenances).

Les extractibles présents de façon caractéristique dans le bois de *Balanites aegyptiaca* sont des stéréoisomères de l'inositol, le pinnitol, le dyosgenin et des sesquiterpènes.

Les extractibles présents de façon caractéristique dans le bois de *Faidherbia albida* sont les suivants : acide gras C14 à C18, acide palmitique, acide oléique et acide linoléique, acide stéarique, stigmastérol, stigmastadienone, et dérivé de cycloartenol.

Pour *Faidherbia albida*, les extractibles dans les deux zones tchadiennes sont quasi identiques, excepté la présence d'alcool oléique pour la zone sahélienne.

Les extractibles de *Balanites aegyptiaca* sont identiques pour la provenance sénégalaise sahélienne et la provenance tchadienne soudanienne, exceptés la présence de disaccharides pour

la provenance sénégalaise. Pour cette même espèce, la provenance sahélienne tchadienne ne semble contenir que du pinnitol (en plus des monosaccharides).

Les différences marquées entre les extractibles des deux espèces d'une part et des trois provenances d'autre part pourraient être mises en relation avec les différences observées entre provenances et espèces pour certaines propriétés physiques et mécaniques du bois, mais l'effet de chaque extractible sur ces propriétés resterait cependant à établir, en tenant compte des probables impacts conjugués de ces différents composés.

4.2 Evolution des caractéristiques des bois en fonction de la croissance des arbres

Cette composante de notre étude a pour objectifs spécifiques : (1) de mettre en évidence l'éventuelle relation entre la croissance des deux espèces étudiées (largeur des cernes) et la pluviométrie relevée dans les zones d'échantillonnages ; (2) d'étudier les relations entre ces largeurs de cerne et la masse volumique du bois constitutif de ces cernes (déterminée par microdensitométrie), son module d'élasticité longitudinal et sa contrainte de rupture en flexion (déterminés par analyse micromécanique), et la composition isotopique du carbone constitutif du bois. Les résultats présentés dans cette section sont issus de mesures réalisées sur des micro-échantillons prélevés au niveau des cernes de croissance.

La présentation des résultats de cette étude des relations croissance – qualité des bois est précédée d'une présentation des spécificités de la morphologie des cernes des deux essences *Faidherbia albida* et *Balanites aegyptiaca,* et d'une série de résultats d'une étude préliminaire à vocation méthodologique sur la répartition des isotopes de carbone analysés respectivement dans la poudre de bois, dans la cellulose et dans la lignine extraite de cette poudre.

4.2.1 Structure morphologique des cernes du bois de *Faidherbia albida* et de *Balanites aegyptiaca*

Préalablement à l'étude des caractéristiques physico-mécaniques et des rapports isotopiques de carbone du bois constitutif des cernes de croissance, il est apparu nécessaire de présenter la structure morphologique de ces cernes pour les deux espèces étudiées en mettant l'accent sur la délimitation inter-cernes souvent considérée comme délicate à appréhender chez les espèces

tropicales. Les figures 4.3 a et 4.3 b ci-dessous présentent la structure morphologique des cernes des deux espèces.

Figure 4.3. Structure des cernes de croissance : (a) *Balanites aegyptiaca* ; (b) *Faidherbia albida* (les flèches indiquent les limites de cernes supposées)

Pour *Faidherbia albida*, on constate que les limites des cernes de croissance sont marquées par une ligne étroite de parenchymes discontinus (figure 4.3b). Cette discontinuité est due à la présence de parenchymes de taille pluri-millimétrique qui masquent partiellement les parenchymes marginaux. Une structuration anatomique similaire a été décrite par Depommier (1998) pour *Faidherbia albida* (provenance Burkina Faso), et par Ndiaye *et al.*, (2020) pour *Acacia raddiana* et *Acacia senegal* (provenance Sénégal).

Pour *Balanites aegytiaca*, on observe la présence de groupes des vaisseaux continus de fréquence variable sur toute la section du tronc. Ces vaisseaux peuvent être considérés comme une limite de cerne. Mbow *et al*., (2013) ont fait la même observation sur cette essence. Les cernes considérés sont parfois très proches, jusqu'à être fusionnés.

Une telle structuration morphologique de cerne a été mise en évidence par Mbow (2009) sur *Pterocarpus erinaceus*, *Bombax costatum* et *Terminalia macroptera*. Mbow considère qu'elle est une conséquence de la sécheresse ; selon lui, les cernes développés en période de sécheresse sont trop proches pour être discriminables. La sécheresse peut aussi entraîner une activité non uniforme du cambium sur la section du tronc, occasionnant des déviations ou des fusions de cernes de façon irrégulière et apparemment aléatoire.

Au Tchad nous avons deux saisons bien marquées dans l'année, une saison sèche et une saison des pluies. La morphologie des cernes de *Balanites aegyptiaca* montre que le début de la croissance pour cette essence est lié au démarrage de la saison des pluies, d'où la présence de vaisseaux réguliers. Cette croissance est ensuite continue tout le long de l'année car la morphologie des cernes de croissance ne présente ensuite aucune particularité, excepté des cernes étroits et des cernes fusionnés certainement dus à la sécheresse estivale. Bien que la croissance de *Balanites aegyptiaca* ne soit pas uniforme sur toute la section du tronc du fait des effets de la sécheresse, on peut se permettre de considérer que ces cernes sont annuels.

Il en est de même pour les cernes de *Faidherbia albida*. En effet, cette espèce présente une phénologie inversée : en saison de pluie, l'arbre semble être en repos car il perd complètement ses feuilles et présente l'apparence d'un arbre mort ; à la fin de la saison de pluie, l'activité cambiale semble reprendre car l'arbre porte à nouveau des feuilles, fleurit et donne des fruits.

En conséquence, il a été possible de déterminer que l'âge des 4 arbres utilisés pour l'étude des caractéristiques du bois en fonction de la croissance est compris entre 16 et 19 ans.

4.2.2 Etude méthodologique exploratoire des rapports isotopiques de carbone 13 ($\delta^{13}C$) déterminés sur de la poudre de bois, de la cellulose et de la lignine

Dans la plupart des études de dendroisotopie, l'analyse des rapports isotopiques est réalisée sur de la cellulose, un des principaux constituants du bois avec l'hémicellulose et la lignine.

Selon l'étude de Bégin *et al.*, (2021), les taux de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine varient d'un cerne de croissance à un autre, et chacun de ces constituants présente un rapport isotopique qui lui est propre. Le fait de privilégier la cellulose comme matériel d'analyse des rapports isotopiques est dû au fait que les rapports isotopiques déterminés sur ce constituant du bois sont considérés comme représentatifs des conditions environnementales ; ils ne contiennent pas d'autres composées chimiques qui peuvent influencer les résultats d'analyse. Toutefois, certaines études des rapports isotopiques sont conduites sur de la poudre entière de bois. Le choix du support d'analyse pour l'étude dendroisotopique dépend de l'essence considérée et des objectifs recherchés.

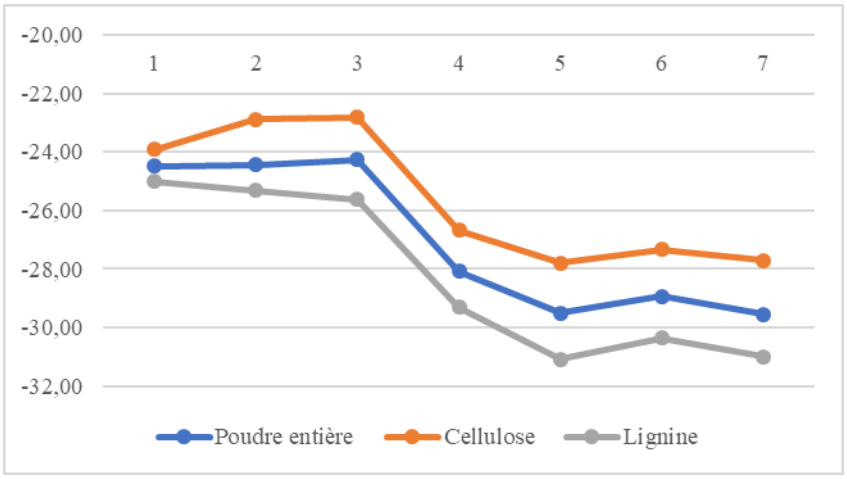
Afin de définir la matière la mieux adaptée pour déterminer les rapports isotopiques dans la suite de notre étude, nous avons procédé à l'analyse isotopique du carbone 13 ($\delta^{13}C$) dans de la poudre extraite de bois, dans de la cellulose et dans de la lignine de *Faidherbia albida*.

21 échantillons dont le processus d'obtention a été décrit dans la section 3.3.2.1.3 de la partie *Méthodes* (7 poudres extraites de bois, 7 celluloses et 7 lignines prélevés dans 7 arbres différents dont 4 dans la zone sahélienne tchadienne et 3 dans la zone soudanienne tchadienne) ont été analysés pour cette étude.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 4.7 et sur la figure 4.4 ci-après :

Provenances	Pd (‰)	Cel (‰)	Lig (‰)	Pd - Cel (‰)	Lig – Cel (‰)
Tchad soudanienne	-24,49	-23,91	-25,01	-0,58	-1,10
	-24,44	-22,87	-25,32	-1,57	-2,44
	-24,26	-22,82	-25,61	-1,44	-2,80
Moyenne	-24,4	-23,2	-25,31	-1,2	-2,11
Tchad sahélienne	-28,07	-26,67	-29,31	-1,40	-2,64
	-29,50	-27,78	-31,08	-1,72	-3,29
	-28,94	-27,33	-30,36	-1,61	-3,03
	-29,55	-27,70	-30,99	-1,85	-3,29
Moyenne	29,02	-27,37	-30,44	-1,65	-3,06

Tableau 4.7. Rapports isotopiques de carbone 13 déterminés sur de la poudre de bois, de la cellulose et de la lignine de *Faidherbia albida*



Pd : poudre extraite de bois ; Cel : cellulose ; Lig : Lignine

Figure 4.4. Comparaison des rapports isotopiques du carbone 13 déterminés sur de la poudre de bois, de la cellulose et de la lignine de *Faidherbia albida* des zones sahélienne et soudanienne tchadienne.

Les résultats du tableau 4.7 représentés pour partie par la figure 4.4 montrent que $\delta^{13}C$ peut être déterminé avec la même pertinence sur de la poudre entière de bois, de la cellulose et de la lignine. En plus de tendances de résultats identiques, l'écart des résultats entre la cellulose et les deux autres matières est faible. Il est compris entre -1,85 et - 0,58 pour la cellulose et la poudre entière, et entre - 3,29 et - 1,10 pour la cellulose et la lignine.

Le test de corrélation de Spearman a été réalisé afin de déterminer le seuil de signification de relation de résultat de $\delta^{13}C$ pour les trois matières. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.8 ci-après.

Tableau 4.8. Matrice des corrélations de Spearman.

Variables	Poudre entière	Cellulose	Lignine
Poudre entière	**1**		
Cellulose	**0,964**	**1**	
Lignine	**0,821**	**0,857**	**1**

Les résultats du tableau 4.8 montrent que les corrélations sont très élevées et sont comprises entre 0,82 ($\delta^{13}C$ poudre entière *vs* $\delta^{13}C$ lignine) et 0,96 ($\delta^{13}C$ poudre entière *vs* $\delta^{13}C$ cellulose).

Ces résultats corroborent ceux de Macfarlane *et al*., (1999) qui ont obtenu une corrélation élevée et positive (coefficient de détermination r^2 = 0,92) entre le $\delta^{13}C$ de la cellulose et celui de la poudre entière de bois pour trois essences, *Eucalyptus globulus*, *Pinus radiata*, et *Pinus pinaster*.

Compte tenu des résultats obtenus, on peut considérer que le $\delta^{13}C$ peut être déterminer avec la même pertinence sur de la poudre de bois, de la cellulose ou de la lignine.

Cependant, les écarts observés entre les résultats nous amènent à privilégier une mesure de $\delta^{13}C$ sur de la poudre entière au lieu la cellulose dont le processus d'obtention est long et coûteux.

4.2.3 Etudes dendrochronologique et dendro-isotopique

Les résultats précédemment présentés ont montré que les cernes du bois contiennent des informations environnementales relatives à la zone de croissance de l'arbre. Les études dendrochronologique et dendro-isotopique vont nous permettre de décoder ces informations environnementales.

Pour ces deux études, nous avons mesuré la largeur des cernes ainsi que dans chaque cerne, la masse volumique du bois, son module d'élasticité longitudinal et sa contrainte de rupture en flexion des cernes, et le rapport isotopique du carbone. Le nombre d'échantillons analysés est indiqué dans le tableau 3.5.

Les résultats de ces études sont présentés successivement de la façon suivante :

- Résultats moyens de la croissance et de la composition isotopique de carbone des cernes par arbre ;

- Autocorrélation d'ordre 1 des résultats de croissance et de la composition isotopique de carbone des cernes ;

- Tendances de variations et intercorrélations entre la croissance et la pluviométrie, la croissance et la composition isotopiques de carbone des cernes, la croissance et la masse volumique, la croissance et le module d'élasticité longitudinal et enfin la croissance et la contrainte de rupture en flexion.

4.2.3.1 Variations interannuelles de la croissance et des $\delta^{13}C$ en fonction des zones climatiques

Les arbres étudiés ont un âge compris entre 15 et 18 ans. Le tableau 4.9 présente comparativement les résultats de la croissance moyenne annuelle et de la composition isotopique du carbone ($\delta^{13}C$) moyenne annuelle des cernes pour les deux espèces et par provenance.

Les résultats montrent que pour chaque espèce, l'accroissement annuel moyen du bois diffère très peu selon la provenance, ceci bien que les arbres aient poussé dans des conditions environnementales très différentes.

La largeur moyenne de cerne est de 7,2 mm/an pour *Faidherbia albida* et 4,3 mm/an pour *Balanites aegyptiaca* en zone climatique sahélienne contre 7,5 mm/an et 4,9 mm/an en zone climatique soudanienne.

Pour *Faidherbia albida*, on n'observe aucune différence significative de $\delta^{13}C$ entre les deux provenances (p-value = 0,47). **Cette absence de différence peut s'expliquer par le fait que *Faidherbia albida* est une plante phréatophyte.** Le Floc'h et Aronson (2013) ont indiqué dans leur livre « Les arbres des déserts enjeux et promesses » que *Faidherbia albida* ne dépend qu'à 5% des eaux de pluie.

Le $\delta^{13}C$ moyen de *Balanites aegyptiaca* dans la zone sahélienne est significativement inférieur à celui de la zone soudanienne (p-value = 0,001). Ces résultats montrent que dans la zone soudanienne où les conditions de croissance sont les plus favorables, le $\delta^{13}C$ est supérieur à celui de la zone sahélienne. Il faut rappeler le fait que la valeur de $\delta^{13}C$ dépend de l'efficacité d'utilisation de l'eau et de la stratégie opportuniste d'utilisation de l'eau par la plante (Gebrekirstos *et al.,* 2010). Si les plantes de la zone sahélienne utilisent l'eau de manière plus efficace que celles de la zone soudanienne, il est alors normal que leur $\delta^{13}C$ soit plus faible.

Les résultats de $\delta^{13}C$ moyen montrent aussi que *Faidherbia albida* et *Balanites aegyptiaca* sont des plantes en C3 : plantes dont le $\delta^{13}C$ est compris entre -12,4 ‰ (lorsque la plante manque d'eau et que ses stomates sont fermés) et - 38 ‰ (lorsque les stomates sont ouverts).

Tableau 4.9. Moyenne annuelle (et écart-type) des largeurs de cernes et des $\delta^{13}C$ par essence et par provenance

	Largeur des cernes (mm)		$\delta^{13}C$ (‰)	
Essences	*F.albida*	*B.aegyptiaca*	*F.albida*	*B.aegyptiaca*
Zone sahélienne	7,2 (4,2) [18]	4,3 (2,6) [16]	-28,5 (0,4)	-27,8 (0,9)
Zone soudanienne	7,5 (3,6) [18]	4,9 (2,8) [15]	-28,6 (0,6)	-26,7 (0,6)
p-value	0,97	0,45	0,47	0,001

() : écart-type

[ ] : âge des arbres

Les courbes de la figure 4.5 présentent de façon comparative pour chacune des deux zones climatiques étudiées les variations annuelles de la largeur de cerne et du rapport isotopique du carbone pour les deux espèces étudiées. La comparaison a été effectuée pour un arbre de chaque espèce (noté Bi pour *Balanites aegyptiaca* et Fi pour *Faidherbia albida*).

* En zone sahélienne, les tendances de variation de la largeur de cernes sont différentes pour les deux arbres sur la période 1999-2004. Ces variations se superposent ensuite sur la période 2004-2013 avec des cernes plus larges pour *Faidherbia albida* que pour *Balanites aegyptiaca*.

* En zone soudanienne, sur l'ensemble de la période étudiée (2004-2017), on n'observe aucune similitude de variations interannuelles de la largeur de cernes pour les deux arbres représentés.

Les tendances de variation du rapport isotopique du carbone $\delta^{13}C$ sont comparables à celles observées pour la largeur de cerne.

En zone sahélienne, les variations pour les deux arbres se superposent sur la période 1999-2011 alors qu'en zone soudanienne, on n'observe aucune similitude de variations interannuelles de $\delta^{13}C$ pour les deux arbres représentés.

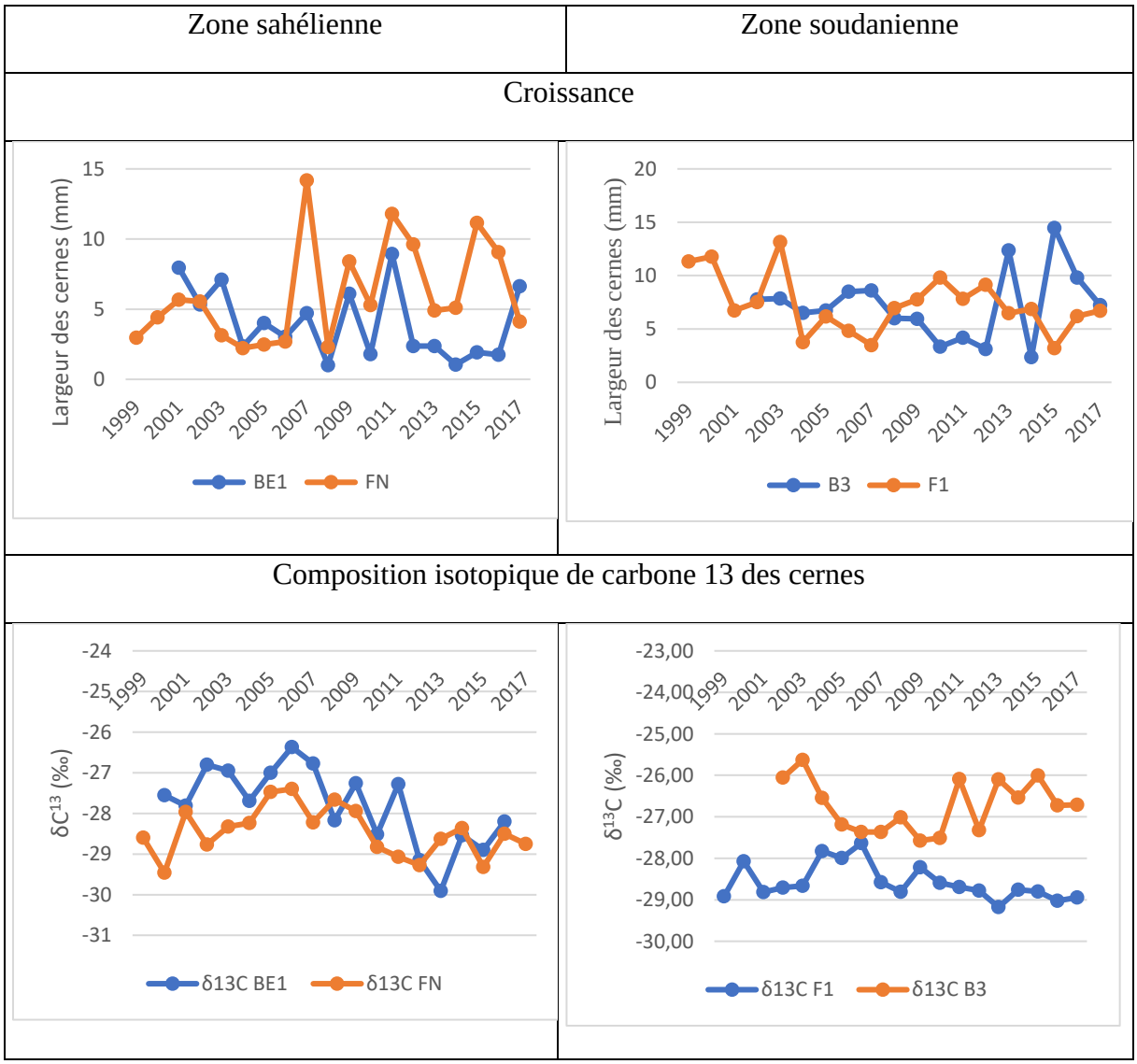


Figure 4.5. Variation de croissance et composition isotopique des cernes suivant les années

4.2.3.2 Autocorrélation d'ordre 1 sur les séries chronologiques de largeur de cerne

La fonction d'autocorrélation est une mesure de la corrélation entre des observations d'une série chronologique séparées par k unités de temps. C'est une des phases essentielles de l'analyse des séries chronologiques qui consiste à déterminer si une valeur observée à un temps t dépend ou non de ce qui a été observé dans le passé.

L'interprétation des résultats consiste à étudier les pics au niveau de chaque décalage pour déterminer s'ils sont significatifs. Pour notre étude, le seuil de signification a été fixé à 5 %.

Les graphes de la figure 4.6 ci-dessous présentent les résultats des autocorrélations déterminées sur les séries chronologiques de largeur de cerne. Les quatre autocorrélogrammes montrent qu'en dehors des premiers termes logiquement associés à un coefficient de corrélation égal à 1, les autres termes des séries ont un coefficient de corrélation inférieur à 0,5 qui est le seuil de signification.

On peut donc en conclure que pour les deux espèces étudiées et pour les deux provenances, le niveau de croissance des arbres une année donnée n'est pas lié à celui de l'année suivante.

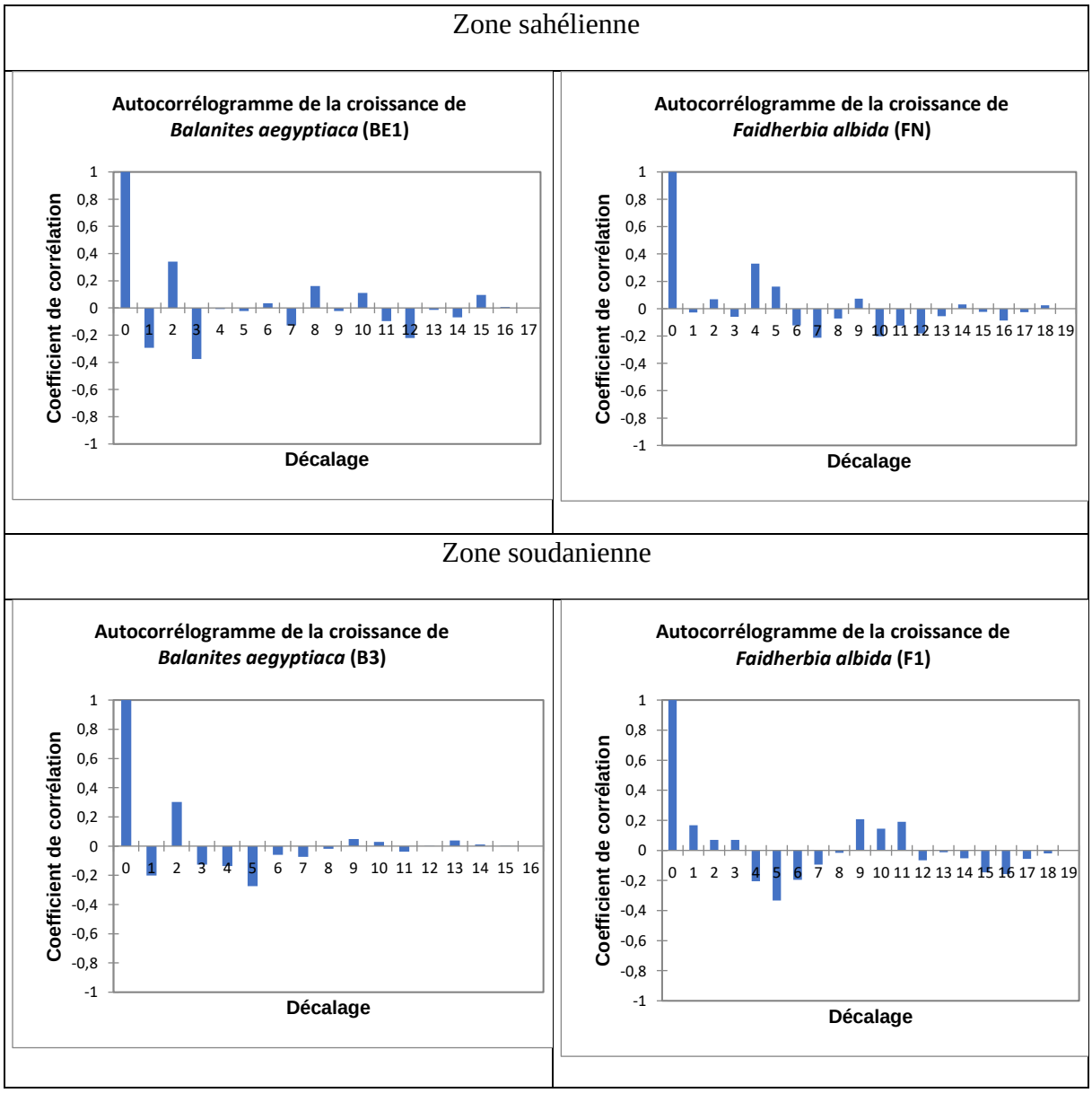


Figure 4.6. Autocorrélogrammes des séries chronologiques de largeur de cerne

4.2.3.3 Relation entre les variables étudiées

Afin de déterminer l'influence d'une série de données sur une autre, nous avons effectué un test d'intercorrélation qui permet d'étudier la relation entre deux séries chronologiques X et Y (analyse des données à l'aide de Xlstat, cf. section 3.4).

Il s'agit d'une corrélation de Bravais-Pearson prenant en considération les couples successifs de valeurs synchrones (xt et yt) d'une série chronologique.

Les coefficients d'intercorrélation sont calculés en introduisant un décalage temporel entre les deux séries d'études, suggérant que l'influence d'une série sur l'autre s'exerce selon un certain délai temporel.

Le calcul est conduit en prenant en compte des couples de valeurs séparées par un décalage constant (xt et yt+k). Ce calcul peut être réalisé pour un ensemble de décalages, positifs et négatifs, mettant en relation le décalage et le coefficient d'intercorrélation correspondant.

Avant de déterminer une intercorrélation, il est important visualiser la tendance des séries chronologiques.

Les variables que nous allons intercorréler sont les caractéristiques qui ont été déterminées au niveau de chaque cerne, auxquelles s'ajoute la pluviométrie ; les intercorrélations vont donc porter sur les couples de variables suivants : pluviométrie et largeur de cernes, largeur de cerne et masse volumique, largeur de cernes et $\delta^{13}C$, largeur de cernes et module d'élasticité longitudinal, largeur de cernes et contrainte de rupture en flexion.

Les régressions linéaires entre ces variables prises deux à deux sont données pour information en annexe 3. Les faibles corrélations obtenues ne permettent pas d'en tirer des enseignements pertinents.

4.2.3.3.1 Relation entre pluviométrie et largeur des cernes

La figure 4.7 présente les tendances de variation de la pluviométrie et de la largeur de cernes sur la période de référence (2001-2017) et le diagramme des intercorrélations correspondant.

Le diagramme ne met en évidence que très peu d'intercorrélations significatives entre la pluviométrie et la largeur de cernes.

Pour chaque essence, on observe au maximum une intercorrélation significative sur la série des données.

Pour *Balanites aegyptiaca* arbre BE1 de la zone climatique sahélienne, l'intercorrélation significative est localisée au décalage - 5 avec un coefficient de corrélation de 0,59 correspondant à l'année 2005.

Pour *Faidherbia albida* arbre FN de la zone sahélienne, le coefficient de corrélation significatif est de - 0,52 correspondant au décalage -2 (année 2000).

Pour *Balanites aegyptiaca* arbre B3 et *Faidherbia albida* arbre F1 de la zone climatique soudanienne, l'intercorrélation significative est localisée respectivement aux décalages 9 et - 1 correspondant aux années 2011 et 2000, avec des coefficients d'intercorrélation de 0,5.

L'analyse des intercorrélations entre la pluviométrie et la largeur de cernes montre qu'un seul coefficient d'intercorrélations apparait significatif pour quasi toutes les séries étudiées, avec des décalages négatifs, excepté pour *Balanites aegyptiaca* arbre B3. La formation des cernes est liée dans ce cas à la pluviométrie de l'année précédant sa formation. L'interprétation de ce résultat est cependant délicate du fait du très faible nombre de pics observés, de l'échantillonnage limité, et du caractère phréatophile de *Faidherbia albida*, éventuellement aussi de *Balanites aegyptiaca* comme indiqué dans les interprétations qui suivent.

Les coefficients de détermination des régressions linéaires entre les deux variables sont très faibles et non significatifs dans tous les cas (cf. en annexe 3 : 0,006 pour *Balanites aegyptiaca* arbre BE1 de la zone sahélienne, 0,008 pour *Faidherbia albida* arbre FN de la zone sahélienne, 0,082 pour *Balanites aegyptiaca* arbre B3 de la zone soudanienne, 0,006 pour *Faidherbia albida* arbre F1 de la zone soudanienne).

Les variations de la largeur de cerne en fonction du temps, c'est-à-dire le long du rayon de la moelle au cambium ne présentent pas de tendances marquées, les fluctuations d'une année à l'autre étant très marquées : on observe cependant une tendance décroissante de moelle vers le cambium pour *Balanites aegyptiaca* arbre BE1 et *Faidherbia albida* arbre F1 et une tendance inverse pour *Faidherbia albida* arbre FN (figure 4.7 et figures en annexe 3.1).

L'absence de relation entre la largeur de cerne et la pluviométrie va à l'encontre des résultats obtenus dans des études similaires conduite sur des essences tempérées ou tropicales en région sèche (Gandolfo, 1994 ; Jdaidi *et al*., 2014 ; Bellifa, 2014 ; Sarmoum 2016 ; Ravaoherinavalona *et al.,* 2020 …).

Ce type de résultat très particulier obtenu peut être dû à plusieurs causes, causes qui peuvent éventuellement se conjuguer :

* La station météorologique dont sont issus les relevés pluviométriques est distante d'environ 20 km des sites où ont été prélevés les bois. Les zones de prélèvement se caractérisent par de fortes fluctuations locales des conditions climatiques et notamment de la pluviométrie, associées à des formes locales de microclimat.

Les précipitations effectives dans les zones de prélèvement peuvent être notablement différentes des enregistrements de la station météorologique.

Ce type de biais a notamment été mentionné par Mariaux (1975) lors de ses essais de dendrochronologie en climat sahélien sur Acacia raddiana

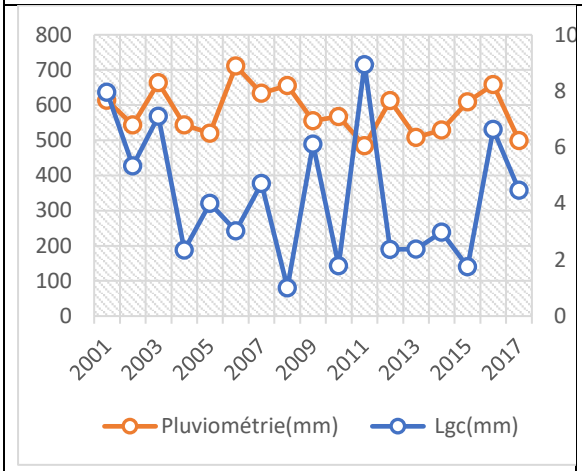
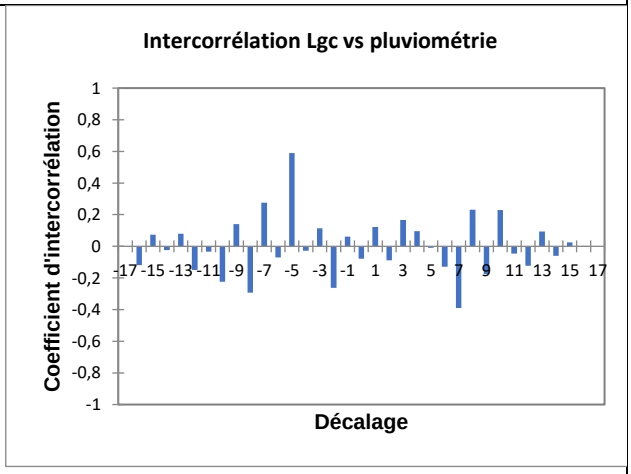
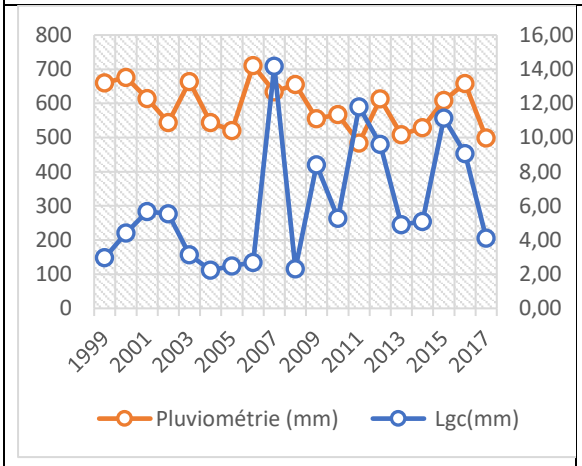
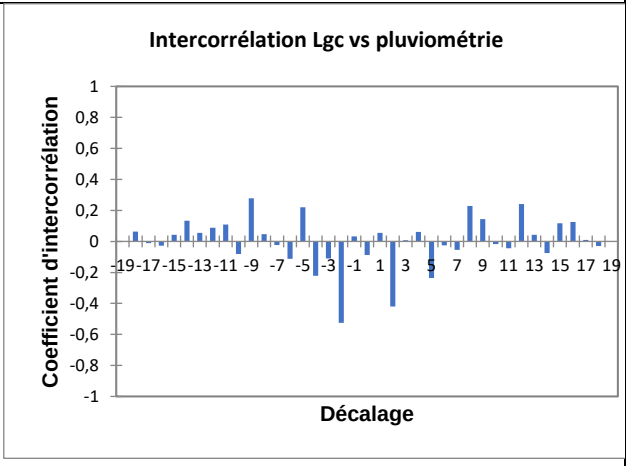
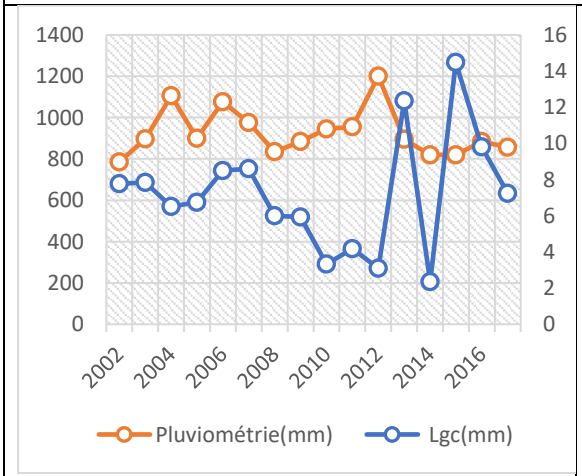
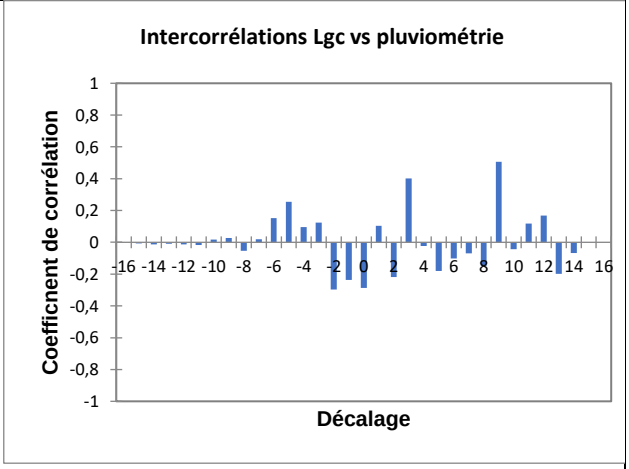
* Comme mentionné précédemment, le comportement phréatophile de *Faidherbia albida* est caractéristique de cette espèce et a été largement étudié. Le fait que l'eau consommée par les arbres provienne à 95 % de la nappe phréatique peut expliquer cette absence de relation entre la pluviométrie et la croissance des arbres étudiés, croissance dont la largeur de cerne est un indicateur.

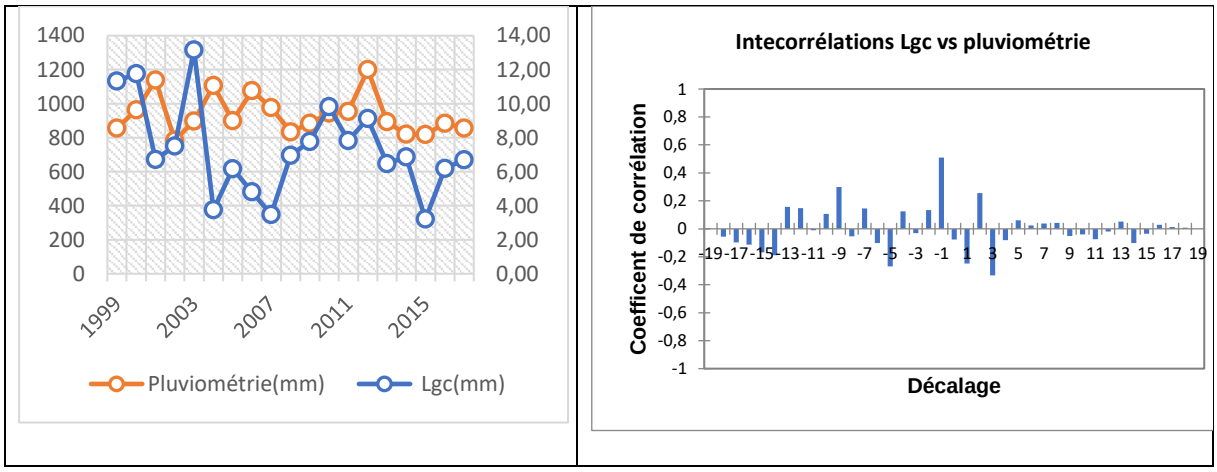
En revanche, les modalités d'utilisation de l'eau de *Balanites aegyptiaca* n'a, à notre connaissance, jamais été étudié. De façon générale, le comportement cette espèce a été largement moins étudié que celui de *Faidherbia albida*. On sait cependant que *Balanites aegyptiaca* présente une racine pivot importante.

L'absence de relation entre la pluviométrie et la croissance de cette espèce pourrait être indicateur d'un comportement phréatophile, intégral ou plus ou moins partiel comme *Faidherbia albida*

* L'étude de la structure morphologique des cernes des deux espèces étudiées (§4.2.1.) a montré que les cernes peuvent être difficiles à délimiter, notamment du fait de la phénologie inversée de *Faidherbia albida* et de la présence de cernes fusionnés chez *Balanites aegyptiaca,* associés à des ruptures du fonctionnement du cambium liées à des aléas climatiques.

Cette difficulté à localiser précisément les limites des cernes a pu introduire un biais dans la mesure de la largeur des cernes.

Variations sur la période de croissance	Intercorrélations
Balanites aegyptiaca arbre BE1 zone sahélienne :	
	
Faidherbia albida arbre FN zone sahélienne:	
	
Balanites aegyptiaca arbre B3 zone soudanienne :	
	
Faidherbia albida arbre F1 zone soudanienne :	



Lgc: Largeur de cerne

Figure 4.7. Relation entre la pluviométrie et la largeur des cernes

4.2.3.3.2 Relation entre largeur des cernes et la masse volumique

La figure 4.8 présente les tendances de variation de la masse volumique et de la largeur de cernes sur la période de référence et le diagramme des intercorrélations correspondant.

On observe une similitude de variation entre la masse volumique et la largeur des cernes pour *Balanites aegyptiaca*, et une tendance opposée pour *Faidherbia albida*, ceci pour les deux provenances géographiques.

Pour *Balanites aegyptiaca*, on observe une légère décroissance de la masse volumique de la moelle vers le cambium et une tendance inverse pour *Faidherbia albida*. La tendance observée pour *Faidherbia albida* va dans le sens des résultats de Traoré (2009) sur le bois de Vène du Mali qui met en évidence une croissance de la densité de la moelle vers la zone de transition duramen-aubier puis une forte décroissance dans l'aubier qui reste tout de même supérieur à celle mesurée près de la moelle, ceci quelle que soit la provenance géographique.

Comme pour l'étude des relations entre pluviométrie et largeur de cerne, les régressions linéaires entre les deux variables ne donnent aucune corrélation significative (R^2 = 0,27 pour *Balanites aegyptiaca* arbre BE1 ; R^2 = 0,3 pour *Faidherbia albida* arbre FN ; R^2= 0,03 pour *Balanites aegyptiaca* arbre B3 ; R^2 = 0,3 pour *Faidherbia albida* arbre F1, annexe 3.4).

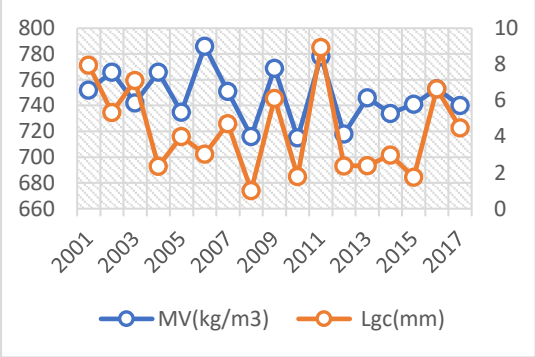
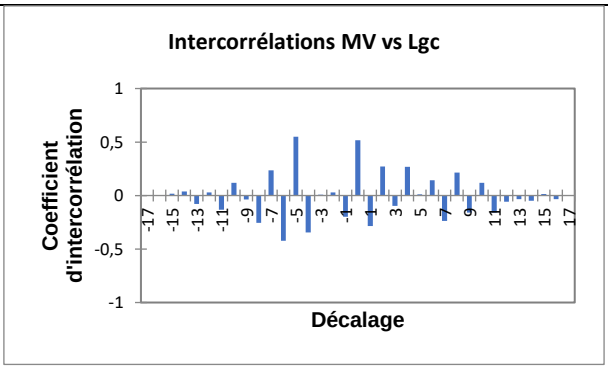
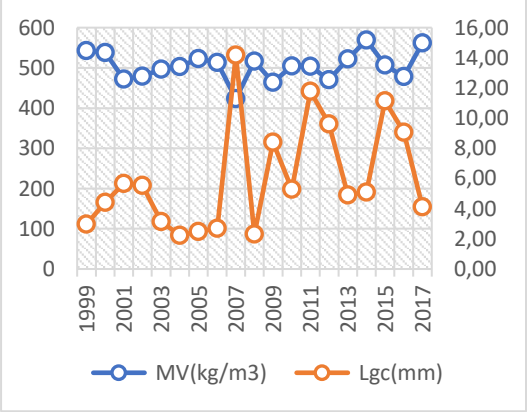
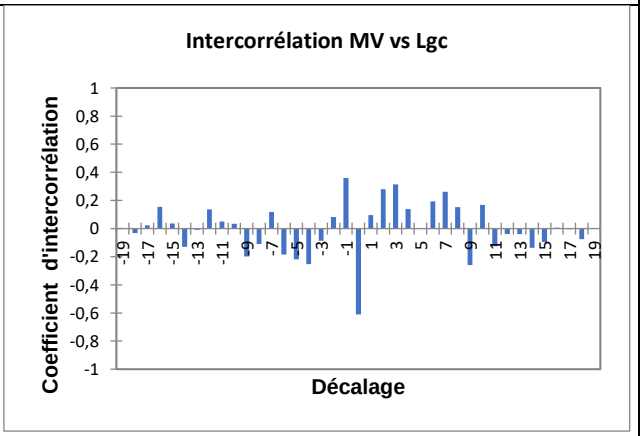
Cette absence de corrélation significative entre les variations de masse volumique et de largeur de cerne a été également mis en évidence par Traoré (2009) dans son étude sur les bois de Vène du Mali.

L'étude des intercorrélations entre les deux variables conduit à des résultats similaires à ceux obtenus précédemment : pour chaque essence, on observe au maximum une intercorrélation significative sur la série des données, mais les résultats restent globalement non significatifs.

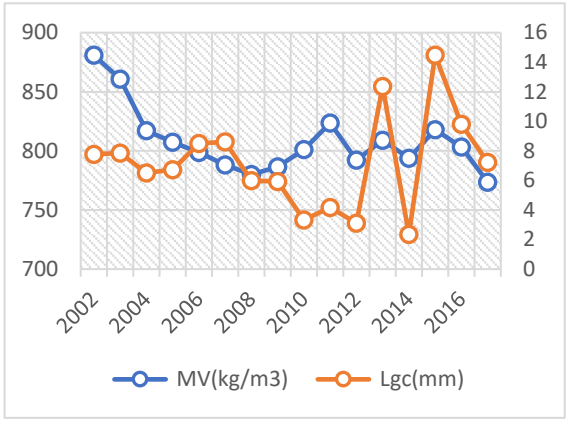
L'absence de relation entre la masse volumique et la largeur des cernes est plus difficilement explicable que l'absence de relation entre la largeur des cernes et la pluviométrie.

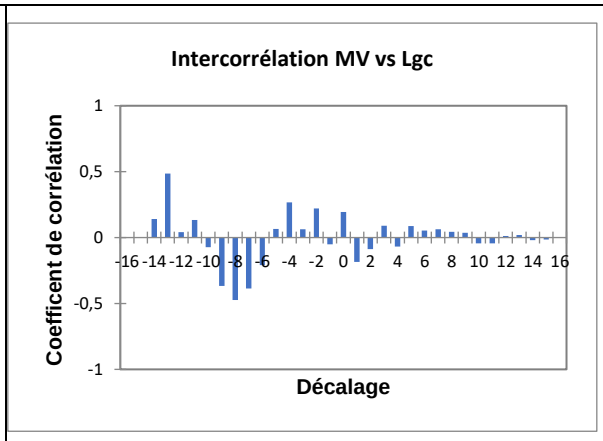
Les différentes explications évoquées précédemment ne peuvent pas être appliquées pour ces deux variables. L'explication est d'autant difficile que les deux variables ont été déterminées conjointement lors des mesures densitométriques.

Ces résultats mettent simplement en évidence le fait que la masse volumique n'est pas liée ou n'est que partiellement liée à la croissance du bois.

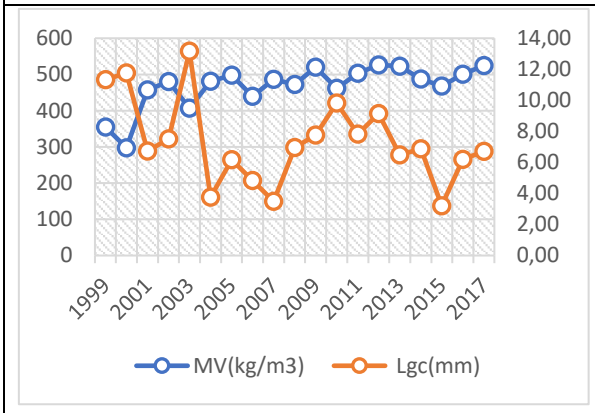
Variations sur la période de croissance	**Intercorrélations**
Balanites aegyptiaca arbre BE1 zone sahélienne :	
	
Faidherbia albida arbre FN zone sahélienne :	
	

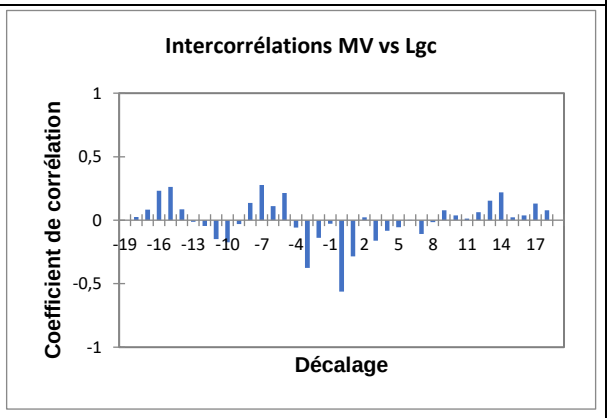
Balanites aegyptiaca arbre B3 zone soudanienne :





Faidherbia albida arbre F1 zone soudanienne :





Lgc: Largeur de cerne ; MV : masse volumique

Figure 4.8. Relation entre largeur des cernes et la masse volumique.

4.2.3.3.3 Relation entre largeur des cernes et $\delta^{13}C$

La figure 4.9 présente les tendances de variation du rapport isotopique δ13C et de la largeur de cernes sur la période de référence et le diagramme des intercorrélations correspondant.

Malgré certaines fluctuations ponctuelles des deux variables qui interfèrent sur les tendances générales, les deux premiers graphiques de la figure 4.9 montrent des tendances de variations inverses entre la largeur des cernes et $\delta^{13}C$ pour *Balanites aegyptiaca* arbre BE1 *et Faidherbia albida* arbre FN, les deux arbres prélevés en zone sahélienne. Ce résultat corrobore le fait que

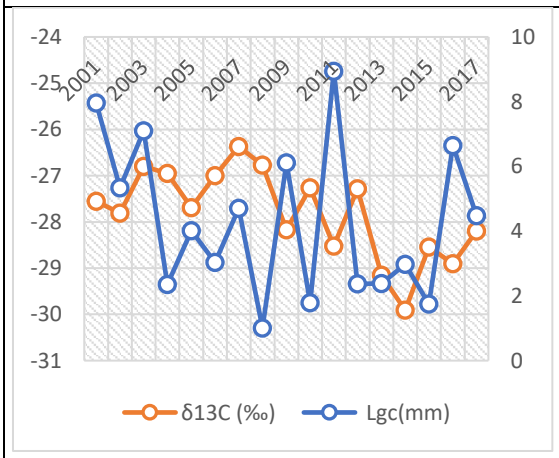
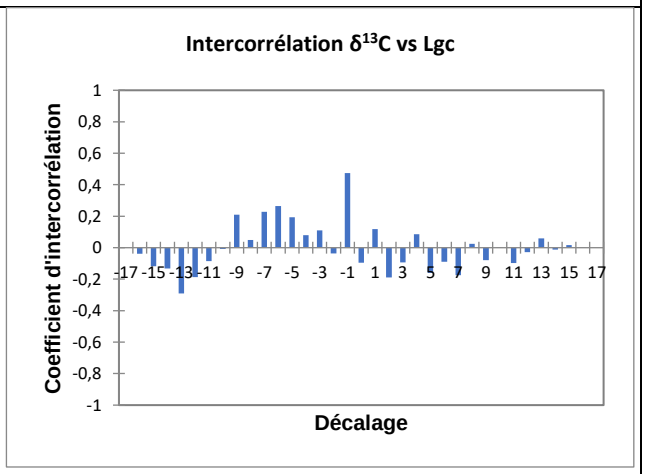
des valeurs élevées de $\delta^{13}C$ correspondent à un stress hydrique élevé associé à une croissance réduite.

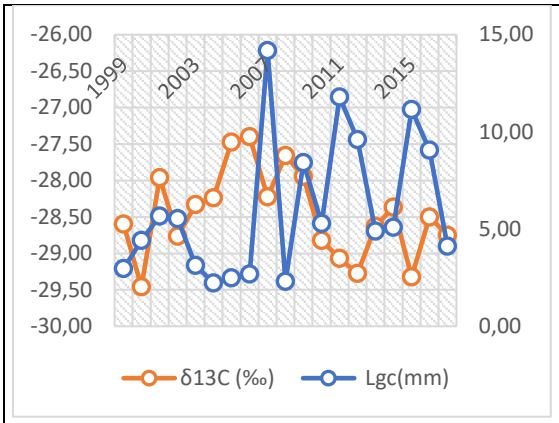
Pour *Balanites aegyptiaca* arbre B3 et *Faidherbia albida* arbre F1 (zone climatique soudanienne), on observe une même tendance de variation entre les deux caractéristiques sur certaines années, et une tendance inverse sur d'autres années. L'utilisation d'un échantillonnage plus large permettrait d'affiner cette étude des relations entre croissance et $\delta^{13}C$ pour la zone soudanienne tchadienne.

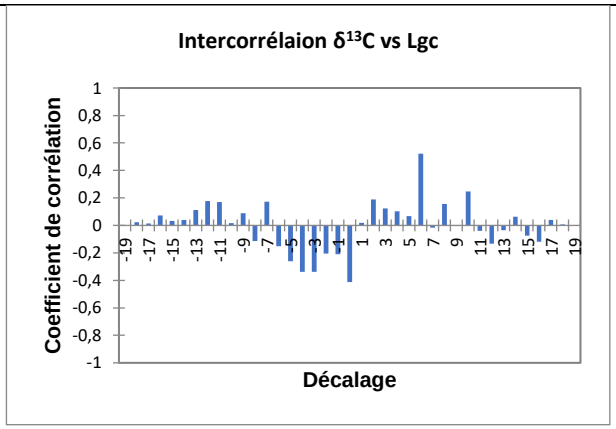
δ13C tend à décroitre de la moelle vers le cambium, c'est-à-dire en fonction de l'avancée des années, ceci pour les 4 arbres (figure 4.9 annexe 3.5). Cette tendance est l'inverse de celle de la pluviométrie pour les deux régions d'études, avec une augmentation des précipitations avec les années (figure 3.2 et 3.4). Ce résultat contribue à montrer que le niveau de stress des arbres étudiés est d'autant moins élevé que la pluviométrie augmente.

L'étude des intercorrélations entre les deux variables met en évidence au maximum deux corrélations significatives sur les séries de résultats pour les arbres étudiés.

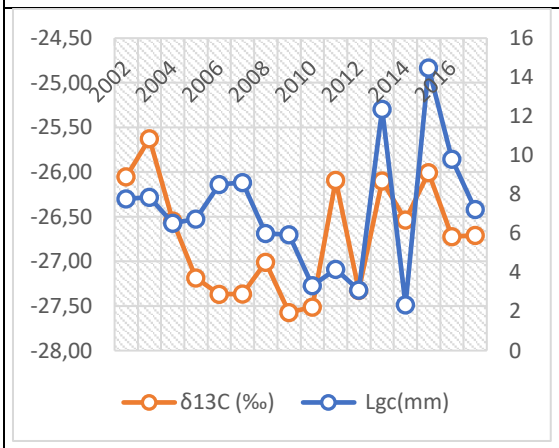
Les régressions linaires établies entre les deux variables (annexe 3.6) sont cependant associées à des coefficients de détermination qui restent très faibles (0,014 pour *Balanites aegyptiaca* arbre BE1 ; 0,17 pour *Faidherbia albida* arbre FN ; 0,15 pour *Balanites aegyptiaca* arbre B3 et 0,02 pour *Faidherbia albida* arbre F1).

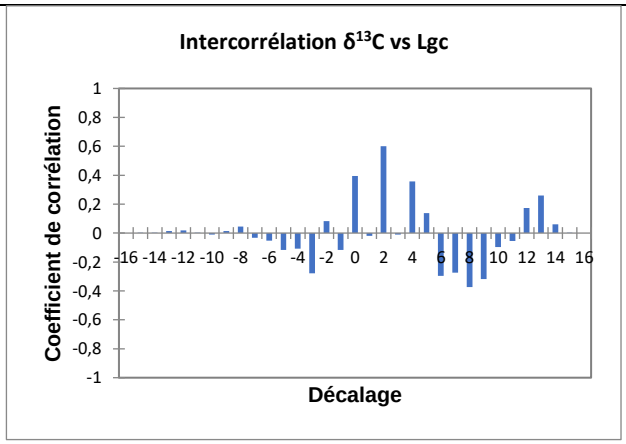
Variations sur la période de croissance	**Intercorrélations**
Balanites aegyptiaca arbre BE1 zone sahélienne :	
	
Faidherbia albida arbre FN zone sahélienne :	



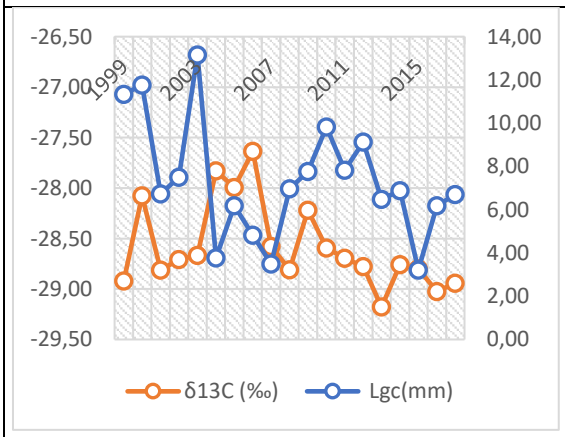


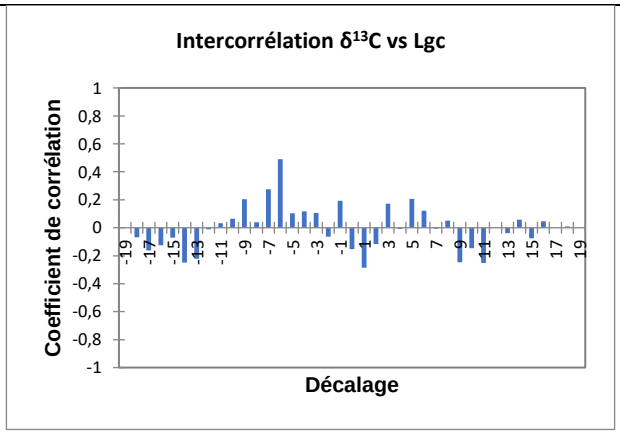
Balanites aegyptiaca arbre B3 zone soudanienne :





Faidherbia albida arbre F1 zone soudanienne :





Lgc: Largeur de cerne ; $\delta^{13}C$: rapport isotopique de carbone 13.

Figure 4.9. Relation entre largeur des cernes et $\delta^{13}C$

4.2.3.3.4 Relation entre la largeur des cernes, le module d'élasticité longitudinal et la contrainte de rupture en flexion

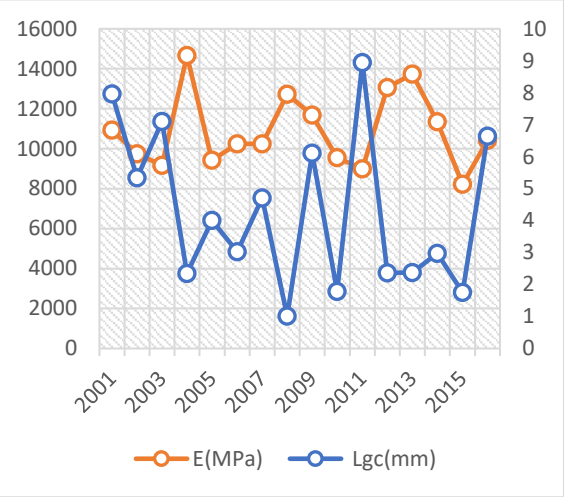
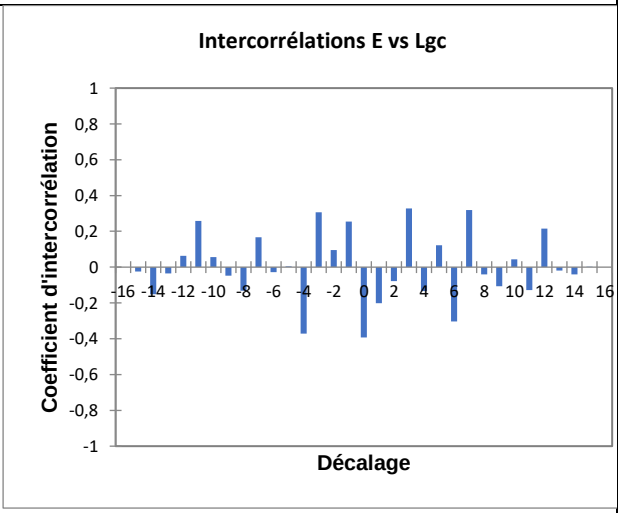
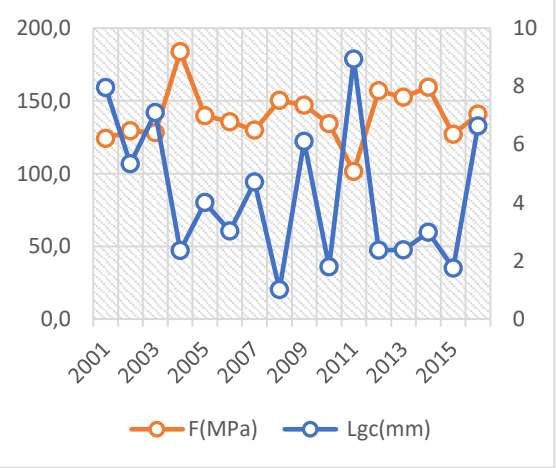
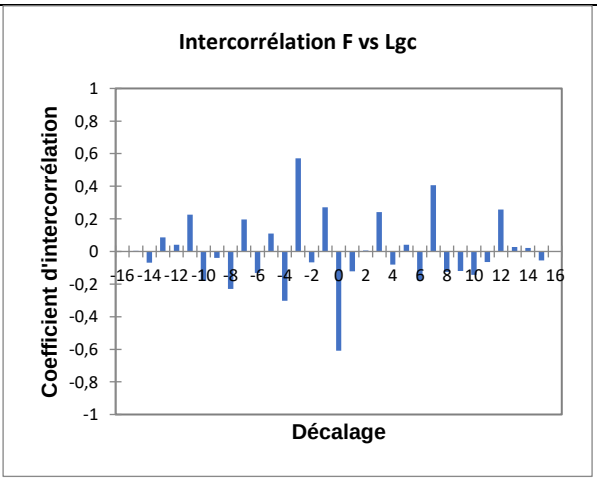
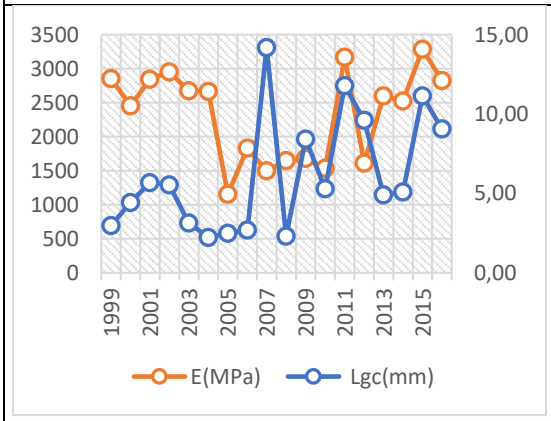
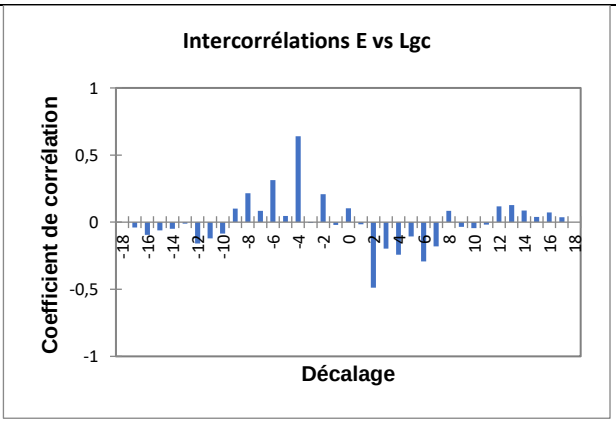
La figure 4.10 présente les tendances de variation de la largeur de cernes en regard de celles des deux caractéristiques mesurées lors des essais de micromécanique, le module d'élasticité et la contrainte de rupture en flexion, et les diagrammes des intercorrélations correspondant.

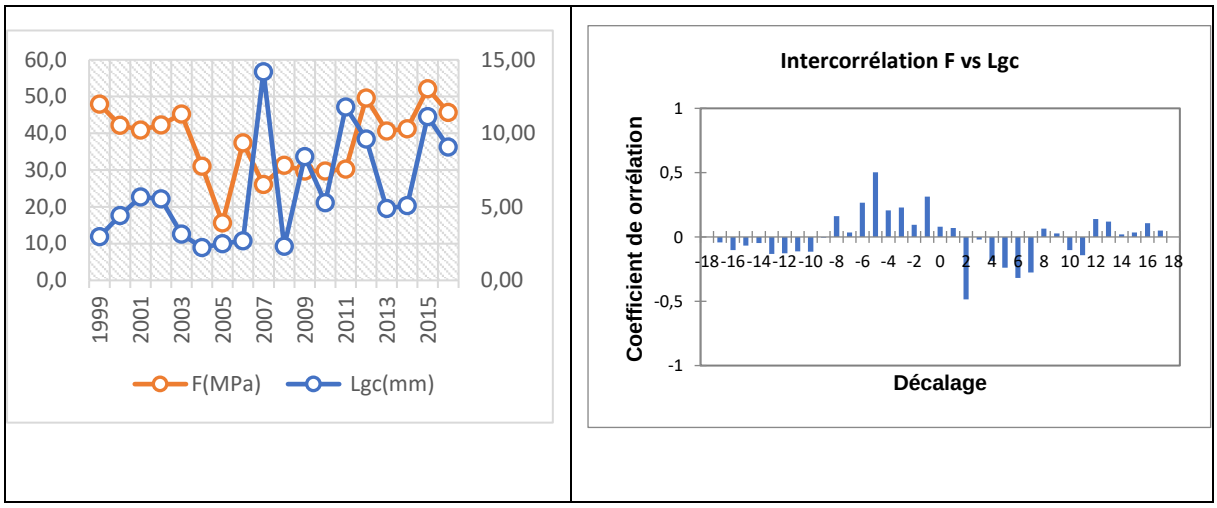
La largeur des cernes et les deux caractéristiques mécaniques varient globalement dans le même sens pour *Faidherbia albida* (cerne large ⇨ caractéristiques mécaniques plus élevées) et de façon opposée pour *Balanites aegyptiaca* (cerne large ⇨ caractéristiques mécaniques plus faibles).

Les variations intra-arbres (annexe 3.8) des deux caractéristiques est élevées, avec une tendance croissante de la moelle vers le cambium.

L'étude des intercorrélations entre le module d'élasticité longitudinal et la largeur des cernes d'une part, et celle entre la contrainte de rupture en flexion et la largeur de cernes d'autre part ne mettent en évidence qu'un nombre limité de corrélations significatives entre les variables (1 à 2 par série de données), ceci pour tous les échantillons étudiés.

L'étude des variations des deux propriétés mécaniques étudiées le long du rayon c'est-à-dire en fonction du temps n'a permis de mettre en évidence que des tendances générales en regard de la largeur de cerne. Contrairement à l'étude des relations masse volumique - largeur de cernes, un biais a pu être introduit lié à la mesure de la largeur de cerne qui n'est pas automatisée comme elle l'est pour les mesures densitométriques (problème de détermination fiable de la limite des cernes précédemment évoqué).

Variations sur la période de croissance	Intercorrélations
Balanites aegyptiaca arbre BE1 zone sahélienne :	
	
	
Faidherbia albida arbre FN zone sahélienne :	
	



Lgc : Largeur de cerne ; E : Module d'élasticité longitudinal à 12 % d'humidité ; F : contrainte de rupture en flexion à 12 % d'humidité.

Figure 4.10. Relation entre la largeur des cernes, le module d'élasticité longitudinal et la contrainte de rupture en flexion.

4.2.4 Conclusions sur l'étude de l'évolution des caractéristiques des bois en fonction de la croissance des arbres

Cette composante de notre étude avait pour objectifs spécifiques de mettre en évidence l'éventuelle relation entre la croissance des deux espèces étudiées (largeur des cernes) et la pluviométrie relevée dans les zones d'échantillonnages, trois propriétés physico-mécaniques de référence (masse volumique, module d'élasticité longitudinal, contrainte de rupture en flexion) et la composition isotopique du carbone constitutif du bois (δ13C). Les résultats présentés dans cette section sont issus de mesures réalisées sur des micro-échantillons prélevés au niveau des cernes de croissance.

La lecture des cernes s'est avérée délicate, avec des limites des cernes de croissance marquées par une ligne étroite de parenchymes discontinus chez *Faidherbia albida*, et par des groupes de vaisseaux continus de fréquence variable sur toute la section du tronc chez *Balanites aegytiaca* Pour cette espèce, les cernes sont parfois très proches, jusqu'à être fusionnés ce qui complexifie leur lecture.

Une première approche méthodologique a permis de considérer que le $\delta^{13}C$ peut être déterminé avec la même pertinence sur de la poudre de bois, de la cellulose ou de la lignine. Une mesure de $\delta^{13}C$ sur de la poudre entière a été privilégiée car plus simple à obtenir.

Pour *Faidherbia albida*, l'absence de différence significative de $\delta^{13}C$ entre les deux provenances peut s'expliquer par le fait que cette espèce est une phréatophyte**.** Pour *Balanites aegyptiaca*, le $\delta^{13}C$ moyen dans la zone sahélienne est significativement inférieur à celui de la zone soudanienne ce qui montre que cette espèce présente une bonne efficacité et une bonne stratégie opportuniste d'utilisation de l'eau.

Une analyse des autocorrélations sur les séries chronologiques de largeurs de cerne a montré que le niveau de croissance des arbres une année donnée n'est pas lié à celui de l'année suivante.

L'étude des relations entre les variables prises deux à deux a donné des résultats contrastés. L'absence de relation entre la largeur de cerne et la pluviométrie peut être liée à plusieurs causes, causes qui peuvent éventuellement se conjuguer : pluviométrie sur les sites de prélèvement des bois différente de celle de la station météorologique éloignée de ces sites, comportement phréatophile avéré de *Faidherbia albida* et possible pour *Balanites aegyptiaca*, délimitation incertaine des cernes liée à leur structure.

L'absence de relation entre la masse volumique et la largeur des cernes est plus difficilement explicable, indiquant simplement que cette caractéristique physique ne serait pas liée à la croissance du bois.

Les relations entre la largeur de cerne et $\delta^{13}C$ pour *Balanites aegyptiaca* et *Faidherbia albida* en zone sahélienne montrent que des valeurs élevées de $\delta^{13}C$ correspondent à un stress hydrique élevé associé à une croissance réduite.

5 Conclusions générales et perspectives

5.1 Conclusion générale

Ce travail de recherche de nature exploratoire a porté sur les variations des caractéristiques du bois de *Faidherbia albida* et de *Balanites aegyptiaca,* deux essences endémiques à caractère emblématique dans toute la zone soudano-sahélienne, notamment au Tchad, terrain principal de l'étude.

Son objectif général était de mieux comprendre le déterminisme de ces variations en relation avec les variations de conditions de croissance des arbres, avec pour finalité de mieux connaitre l'hétérogénéité de comportement technologique des bois de ces deux essences afin de mieux les valoriser dans les processus de reboisement et d'élargir leur domaine local d'utilisation.

Faidherbia albida et *Balanites aegyptiaca* présentent en effet un rôle socio-économique important dans toute leur zone naturelle de répartition. Au Tchad, le bois de ces deux essences est couramment utilisé dans une large gamme d'emploi. *Balanites aegyptiaca* est utilisé en menuiserie, en construction traditionnelle, pour la fabrication d'ustensiles de cuisine et en ameublement. *Faidherbia albida* est davantage réservé à des emplois plus spécifiques comme la fabrication d'objets d'art (sculpture, tabletterie), d'ustensiles de cuisine (pilon, mortier, calebasse…), la construction de cases et de greniers, et la fabrication des pirogues. Les deux essences sont aussi largement utilisées sous forme de bois énergie. Du fait de leur distribution disséminée dans leur aire naturelle de répartition et de leur caractère clairsemé, ces espèces ne font évidemment l'objet d'aucune exploitation industrielle et sont uniquement utilisées localement.

Notre étude a été organisée suivant deux approches.

Dans un premier temps, nous avons déterminé les principaux indicateurs de stabilité physique, de comportement mécanique, et la composition chimique du bois des deux essences, et étudié leurs variations en fonction des zones de prélèvement : les deux zones climatiques tchadiennes (zone sahélienne et zone soudanienne), et la zone sahélienne sénégalaise. La détermination de ces caractéristiques physico-mécaniques et chimiques a été complétée par des mesures plus spécifiques sur un nombre limité d'échantillons afin de tenter d'expliquer l'origine de certaines variations. Les taux d'extractibles ont été ainsi déterminés pour expliquer les résultats atypiques observés (masse volumique faible *vs* caractéristiques mécaniques élevées) entre la densité et les caractéristiques mécaniques (module d'élasticité longitudinal, contrainte de rupture en flexion, contrainte de rupture en compression) de *Balanites aegyptiaca*, et des mesures d'angle des

microfibrilles et d'analyses des constituants des extractibles ont été mises en relation avec certains résultats de retraits pour *Faidherbia albida*.

Dans un second temps, les variations radiales de caractéristiques physiques, mécaniques, et de composition isotopique ont été étudiées en fonction des variations de la croissance du bois par des méthodes d'investigations spécifiques. Des mesures ont été réalisées sur des cernes successifs afin d'étudier les variations radiales de la largeur des cernes de croissance et de la masse volumique du bois le long du rayon (microdensitométrie), les variations radiales du module d'élasticité longitudinal et de la contrainte de rupture en flexion (analyses micromécaniques), et l'analyse des variations radiales de rapports isotopiques de carbone.

Dans le cadre de la première approche, les mesures ont été réalisées sur des éprouvettes de forme et de dimension normalisées suivant des méthodes conventionnelles de caractérisation.

Pour l'étude des variations radiales des propriétés, les mesures ont été effectuées sur des micro-échantillons prélevés cerne par cerne afin de mettre en relation les caractéristiques étudiées et l'évolution de la croissance du bois le long du rayon.

* Le premier volet de l'étude a mis en évidence que le bois de *Balanites aegyptiaca* est mi-lourd, avec des retraits transversaux moyens et un faible point de saturation. Ses propriétés mécaniques en rupture sont moyennes (compression et flexion) et il présente une faible rigidité. Son module spécifique est très faible, caractéristique d'arbres de savane.

Le bois de *Faidherbia albida* est très léger à léger ; ses retraits linéaires de séchage et son point de saturation des fibres sont faibles à moyens. Ses propriétés mécaniques en rupture (compression et flexion) et son module d'élasticité longitudinal sont faibles. Comme pour *Balanites aegyptiaca*, les faibles modules spécifiques obtenus pour les trois provenances sont typiquement indicateurs de bois de savanes.

L'étude des variations en fonction des zones de prélèvement a mis en évidence des tendances très variables d'une essence à l'autre et selon les propriétés étudiées.

. Pour ***Balanites aegyptiaca***, on observe des tendances opposées, avec un retrait tangentiel significativement plus élevé en zone soudanienne tchadienne que dans les zones sahéliennes tchadienne et sénégalaise, mais un retrait radial significativement moins élevé. Aucune différence significative n'est observée entre les trois zones pour le retrait volumique.

Le point de saturation des fibres est significativement plus bas en zone sahélienne tchadienne mais globalement faible pour les trois provenances.

La masse volumique est significativement plus élevée en zone soudanienne tchadienne que dans les deux autres zones, mais aucune différence significative d'infradensité n'est observée entre les trois zones.

La contrainte de rupture en compression et le module d'élasticité longitudinal sont moins élevés en zone soudanienne tchadienne que dans les deux autres zones.

Les taux de lignine et d'hémicellulose sont significativement plus élevés dans la zone sahélienne tchadienne mais aucune différence significative n'est observée entre les provenances pour le taux d'extractibles et le taux de cellulose.

. Pour ***Faidherbia albida***, les retraits transversaux et le retrait volumique total sont significativement plus élevés dans la zone sahélienne sénégalaise que dans les deux provenances tchadiennes.

L'infradensité, la masse volumique, les trois caractéristiques mécaniques, le taux d'extractibles et le taux de lignine sont significativement plus élevés dans la zone sahélienne sénégalaise ; en revanche, les taux d'hémicellulose et de cellulose sont plus élevés dans la zone sahélienne tchadienne.

. Les **analyses GC-MS** montrent que les monosaccharides sont les seuls extractibles communs aux deux espèces (et aux trois provenances).

Les extractibles présents de façon caractéristique dans le bois de *Balanites aegyptiaca* sont des stéréoisomères de l'inositol, le pinnitol, le dyosgenin et des sesquiterpènes.

Les extractibles présents de façon caractéristique dans le bois de *Faidherbia albida* sont les suivants : acide gras C14 à C18, acide palmitique, acide oléique et acide linoléique, acide stéarique, stigmastérol, stigmastadienone, et dérivé de cycloartenol.

Les différences marquées entre les extractibles des deux espèces d'une part et des trois provenances d'autre part pourraient être mises en relation avec les différences observées entre certaines propriétés physiques et mécaniques du bois, mais l'effet de chaque extractible sur ces propriétés resterait cependant à établir.

* Le second volet de l'étude a donné des résultats contrastés. La lecture des cernes s'est avérée délicate, notamment *Balanites aegytiaca* du fait de cernes parfois très proches, voire fusionnés. Des mesures comparatives ont montré que le rapport isotopique $\delta^{13}C$ peut être déterminé avec la même pertinence sur de la poudre de bois, de la cellulose ou de la lignine.

Pour *Faidherbia albida*, l'absence de différence significative de $\delta^{13}C$ entre les deux provenances est liée au caractère phréatophile de cette espèce. Le $\delta^{13}C$ moyen de *Balanites aegyptiaca* de la zone sahélienne est significativement inférieur à celui de la zone soudanienne ce qui montre que cette espèce présente une bonne efficacité et une bonne stratégie opportuniste d'utilisation de l'eau.

L'absence de relation entre la largeur de cerne et la pluviométrie peut être liée à plusieurs causes : pluviométrie sur les sites de prélèvement des bois différente de celle de la station météorologique éloignée de ces sites, comportement phréatophile de *Faidherbia albida*, éventuellement de *Balanites aegyptiaca*, délimitation incertaine des cernes.

L'absence de relation entre la masse volumique et la largeur des cernes est plus difficilement explicable, indiquant simplement que cette caractéristique physique n'est pas liée à la croissance du bois.

Les relations entre la largeur de cerne et $\delta^{13}C$ pour *Balanites aegyptiaca* et *Faidherbia albida* en zone sahélienne montrent que des valeurs élevées de $\delta^{13}C$ correspondent à un stress hydrique élevé associé à une croissance réduite.

5.2 Perspectives

Comme mentionné en introduction, les travaux de recherche menés à bien sur les deux espèces étudiées présentent un caractère exploratoire du fait de la nature même des deux essences ciblées dont la qualité du bois n'avait fait l'objet que de très peu d'investigations, et du fait du faible échantillonnage utilisé pour l'ensemble des essais réalisé (organisation de l'échantillonnage sous contraintes à cause d'importants problèmes d'ordre « logistique »).

Ils ont cependant permis d'améliorer les connaissances sur les caractéristiques physico-mécaniques et chimiques de ces deux espèces de zone sèche en relation avec leurs provenances et leurs conditions de croissance.

En conséquence, les perspectives de recherche à venir sur ces deux espèces sont multiples et concernent tous les compartiments de l'étude qui vient d'être menée à bien.

Il serait illusoire de se montrer trop exhaustif et nous retiendrons les axes de recherche suivants qui nous paraissent les plus réalistes et les plus pertinents :

* Pour toutes investigations à venir concernant la qualité du bois de ces espèces (caractérisation physico-mécanique, composition chimique, durabilité naturelle etc.), privilégier l'utilisation des branches lors de la constitution de l'échantillonnage :

- pour s'affranchir des problèmes liés à la limitation des autorisations de coupe,

- pour préserver la ressource de plus en plus fragilisée par le dérèglement climatique,

- pour mieux appréhender l'évolution de la croissance de l'arbre par unité de croissance, ceci afin de faciliter la datation des cernes de croissance.

Une telle approche permettra de constituer un échantillonnage beaucoup plus large que celui utilisé pour la présente étude et donc de limiter les incertitudes concernant l'interprétation des résultats obtenus sur un nombre limités d'échantillons.

* Etudier les rythmes et les arrêts de croissance des deux espèces en relation avec les variations climatiques afin de comprendre le déterminisme du phénomène de disparition/fusion partielle des cernes sur certaines sections du tronc. Le suivi de la croissance permettra également de connaitre l'âge auquel certaines branches sont exploitables et d'établir le lien entre la formation des cernes et le climat de la zone de prélèvement. Cette étude de rythmes de croissance peut être suivi d'une étude anatomique du bois des deux espèces.

* Etudier la durabilité des bois des deux essences, caractéristique qui n'a fait l'objet d'aucune recherche jusqu'à présent, alors qu'elle est de première importance pour toute application en milieu extérieur exposé, même si sur ce point les contraintes en régions tropicales sèches sont moindres qu'en région tropicale humide.

* Pour une meilleure compréhension de l'influence des conditions de croissance sur les propriétés du bois de *Faidherbia albida* et *Balanites aegyptiaca*, élargir l'étude à d'autres provenances où elles sont très présentes dans la zone soudano-sahélienne.

Enfin, pour contribuer de manière efficace à la lutte contre la désertification, le développement de l'emploi du bois des deux espèces, nécessairement à un échelon local, ne peut être envisagé sans une stratégie de restauration adaptée et une gestion rigoureuse des peuplements.

Avec sa phénologie inversée, sa capacité à fertiliser le sol grâce à la fixation d'azote et au prélèvement de sels minéraux dans le sol profond pour les faire migrer vers la surface, l'emploi de *Faidherbia albida* doit être étendu, généralisé et vulgarisé auprès des agriculteurs afin que cette espèce soit plantée plus largement dans le cadre de pratiques agroforestières.

Le développement de l'usage de cette espèce aura pour conséquence de limiter l'usage d'engrais de synthèse et d'augmenter le revenu des agriculteurs par l'exploitation des branches.

Il faudra cependant veiller à ce qu'une telle évolution de l'usage de cette espèce arborée ne ravive pas les conflits ancestraux agriculteurs-éleveurs, car les feuilles, les fleurs et les fruits de l'arbre sont utilisés comme aliment pour bétails. Il est important qu'en début de saison des pluies (période correspondant aux semis et à la rareté des pâturages), les éleveurs n'aillent pas glaner les quelques rares feuilles que les arbres portent encore pour nourrir leurs animaux.

Balanites aegyptiaca doit être valorisé à grande échelle dans les différents programmes de reboisement car cette espèce présente une bonne efficacité d'utilisation de l'eau, comme le montrent nos résultats de rapport isotopique du carbone, ce qui constitue un atout dans le contexte de changement climatique. De plus, le bois de *Balanites aegyptiaca* présente des bonnes caractéristiques technologiques qui le rendent adapté à une large gamme d'emplois.

6 Références bibliographiques

Adamou, S., Abdoul-Salam, A. I., Aissetou, D. Y. (2020). Caractérisation de la population de *Balanites aegyptiaca* (L.) Del et perception de son potentiel socioéconomique dans la partie Sud-Ouest du Niger. International Journal of Biological and Chemical Sciences, 14(5), 1698-1715. https://doi.org/10.4314/ijbcs.v14i5.17

AGRHYMET (2010). Le Sahel face aux changements climatiques - Enjeux pour un développement durable. Bulletin mensuel/numéro spécial, Centre Régional AGRHYMET, 43 p. http://base.afrique-gouvernance.net/docs/le_sahel_face_aux_changements_climatiques.pdf

Arbonnier, M. (2002). Arbres, arbustes et lianes des zones sèches d'Afrique de l'Ouest, 2e éd. CIRAD–MNHN, éditions QUAE, Paris, France, 576 p.

Aussenac, G. (2000). Interactions between forest stands and microclimate: Ecophysiological aspects and consequences for silviculture. Annals of forest science, 57(3), 287-301. doi.org/10.1051/forest:2000119

Aussenac, G. (1978). La sécheresse de 1976 : influence des déficits hydriques sur la croissance des arbres forestiers. Revue Forestière Française, vol.2, p.103-113. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03396375/document

Bégin, C., Nicault, A., Bégin, Y. (2021). Utilisation des archives naturelles pour la reconstitution du passé hydro-climatique dans le Nord-Québécois. Commission géologique du Canada, dossier public 8768, projet utilisation des archives naturelles pour la reconstitution du passé hydro-climatique. https://www.researchgate.net/publication/353453203_Utilisation_des_archives_naturelles_pour_la_reconstitution_du_passe_hydro-climatique_dans_le_Nord_Quebecois_-_Synthese_du_projet_ARCHIVES

Bhat, K. M., Priya, P. B. (2004). Influence of provenance variation on wood properties of teak from the Western Ghat Region in India. IAWA Journal, 25, 273–282. https://doi.org/10.1163/22941932-90000365

Bellifa, M., Bencherif, K., Latreuche B.N. (2014). Impact de l'âge et des variations pluviométriques sur la croissance du pin d'Alep (Pinus halepensis. Mill) : Cas du peuplement artificiel de la forêt domaniale de Tlemcen. (Algeria). Mediterranea - Serie de Estudios Biológicos, 2014 Época II Nº 25, Universidad de Alicante, 37 p. http://dx.doi.org/10.14198/MDTRRA2014.25.04

Bordonné P.A. (1989). Module dynamique et frottement intérieur dans le bois. Mesures sur poutres flottantes en vibration naturelles. Thèse de Doctorat en Sciences du Bois, Institut National Polytechnique de Lorraine, 136 p. https://agritrop.cirad.fr/598129/1/Th%C3%A8se%20Pierre%20Antoine%20Bordonn%C3%A9.pdf

Boyd, J.D. (1974). Anisotropic shrinkage of wood: identification of dominant determinations. Journal of Japan Wood Research Society 20 (10): 473-482.

Breda, N., Granier A., Aussenac, G. (2004). La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiologique et influence sur les arbres forestiers. Revue Forestière Française, AgroParisTech, 56 (2), p.109-131. DOI : 10.4267/2042/5081

Brenan, J. P. M. (1959). Mimosoideae. Flora of Tropical East Africa: Leguminosae Subfamily, part 1, 173 p.

Charron, S., Jourez, B., Marchal, M. and Hébert, J. (2003). Étude comparative des caractéristiques physiques et mécaniques du bois des mélèzes d'Europe (*Larix decidua* Mill.), du Japon (*Larix kaempferi* (Lambert) Carr.) et de leur hybride (*Larix x eurolepis* Henry). Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 2003 7 (1), 5–16. https://popups.uliege.be/1780-4507/index.php/base/issue/index.php?id=14436

Couchoud, I. (2008). Les isotopes stables de l'oxygène et du carbone dans les spéléothèmes : des archives paléoenvironnementales. Quaternaire, 19(4), 275-291. https://doi.org/10.4000/quaternaire.4532

Coster, C. (1928). Zur anatomie und physiologie der zuwachszonen- und jahresringbildung in der tropen. Ann. Jard. Bot. Buitenz., 38, pp.1-114.

Creac'h, P. (1940). Le Balanites ægyptiaca. Ses multiples applications au Tchad. Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée, 20 (228) : 578-593. https://www.persee.fr/doc/jatba_0370-3681_1940_num_20_228_1576

Condé, S., Otto, T., Moussa, I., Lambs, L., Corenblit, D. (2020). Analyses exploratoires dendrochronologique et dendro-isotopique des ripisylves de la rivière Milo (Guinée). Physio-Géo. Géographie physique et environnement, Volume 15, 211-231. https://doi.org/10.4000/physio-geo.11681

CTFT. (1988). *Faidherbia albida* (Del) A. Chev (Synonyme Acacia albida Del) : Monographie. Centre Technique Forestier Tropical, Département du CIRAD, Nogent/Marne (France), 72p. https://ur-forets-societes.cirad.fr/content/download/4729/37906/version/1/file/faidherbia_albida.pdf

CTFT. (1989). Faidherbia albida (Del) A. Chev (Synonyme *Acacia albida* Del) - Caractère sylvicoles et méthode des plantations. Bois et Forêt des Tropiques, 222, 4e trimestre 1989, 55-68. http://bft.cirad.fr/cd/BFT_222_55-68.pdf

Daux, V. (2013). Reconstruction du climat à partir de la composition isotopique de l'oxygène et du carbone des cernes d'arbres. La Météorologie. Météo et Climat, 8 (80), pp.14. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02469941/document

Dendoncker M. Ngom D., Vincke C. (2015). Trees dynamics (1955-2012) and their uses in the Senegal's Ferlo region: insights from a historical vegetation database, local knowledge and field inventories. Bois et Forêts des Tropiques, 326 (4): 25-41. https://doi.org/10.19182/bft2015.326.a31281.

Depierre, D., Gillet, H. (1971). Désertification de la zone sahélienne au Tchad (Bilan de 10 années de mise en défens). Bois et forêts des tropiques, 139, 3-25. https://revues.cirad.fr/index.php/BFT/article/view/19119

Depommier, D. (1998). Etude phénologique de *Faidherbia albida* : effet de l'émondage, du site et de la dimension de l'arbre sur les phénoplastes de l'espèce au Burkina Faso. In Campa Claudine (éd.), Grignon C. (éd.), Gueye M. (éd.), Hamon Serge (éd.). L'acacia au Sénégal. Paris : ORSTOM, p. 159-179. (Collection colloques et séminaires). Réunion thématique sur l'acacia au Sénégal, 1996-12-03/1996-12-05, Dakar (Sénégal). https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_7/divers2/010016074.pdf

Derbal, W., Zérizer, A., Gérard, J., Guibal, D. (2015). Point de saturation de fibres (PSF) de trois essences de bois d'Algérie. 4èmes Journées scientifiques du GDR 3544 Sciences du bois, Clermont-Ferrand, France, 4-6 novembre 2015, p 70-71. https://agritrop.cirad.fr/579756/

Détienne, P., Oyono, F., Durrieu de Madron, L., Demarquez, B., Nasi, R. (1998). L'analyse de cernes : applications aux études de croissance de quelques essences en peuplements naturels de forêt dense africaine. Édit. Cirad, série FORAFRI, document 15, Montpellier, 42 p. http://forafri.cirad.fr/ressources/forafri/05.pdf

Dezzeo, N., Worbes, M., Ishii I., Herrera, R. (2003). Annual tree rings revealed by radiocarbon dating in seasonally flooded forest of the Mapire River, a tributary of the lower Orinoco River, Venezuela. Plant Ecology, 168(1): 165-175. https://doi.org/10.1023/A:1024417610776

Dilla, A. M., Smethurst, P. J., Barry, K., Parsons, D., Denboba, M. A. (2019). Tree pruning, zone and fertiliser interactions determine maize productivity in the Faidherbia albida (Delile) A. Chev parkland agroforestry system of Ethiopia. Agroforestry Systems, 93(5), 1897-1907. https://doi.org/10.1007/s10457-018-0304-9

Eguiluz-Piedra, T., Zobel, B. J. (2007). Geographic variation in wood properties of Pinus tecunumanii. Wood and Fiber Science, 18(1), 68-75. https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/963

Elfeel, A. A. (2004). Genecology and Conservation Status of *Balanites aegyptiaca* L. Del. (Heglig tree) In Sudan. Doctoral dissertation, Sudan University of Science and Technology, 171 p. http://repository.sustech.edu/handle/123456789/5216

Ennajah, A., Guibal, F., Hanchi, B., Mouillot, F., Garchi, S. (2010). Croissance radiale du chêne-liège et climat en Tunisie. Sécheresse, 21(1), 34-41. https://doi.org/10.1684/sec.2010.0228

Fall, M., Trimborn, P., Ferhi, A. (1998). Le ^{13}C dans le bois des végétaux, un indicateur pluviométrique pour le Sahel. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science, 326 (6), 407-412. https://doi.org/10.1016/S1251-8050(98)80063-3

Fahn, A., Werker, E., Baas, P. (1986). Wood anatomy and identification of trees and shrubs from Israel and adjacent regions. Israel Academy of Sciences and Humanities, Jerusalem, Israel, 221 p. ISBN 13: 9789652080738.

FAO (2005). Evaluation des ressources forestières mondiales 2005. Tchad - Rapport national, 57 p. https://www.fao.org/forestry/9124-03403b2e5d2f0f2f23b5545badc22a2fa.pdf

FAO (2015). Evaluation des ressources forestières mondiales 2015. Rapport national, Tchad, 90 p. https://www.fao.org/documents/card/fr/c/becff262-51b6-4880-85d8-51354431e926/

Gandolfo, C., Tessier, L. (1994). Analyse dendroécologique sur des sapins (Abies alba Mill) et des épicéas (Picea abies (L) Karst) de différentes classes de défoliation dans la forêt de Vigo di Ton (Trento, Italie Ann. For. Sci., 51 4 (1994) 391-406. https://doi.org/10.1051/forest:19940405

Green Climate Fund (2019). Country programme – Republic of Chad. (30 mai, 2019). https://www.greenclimate.fund/document/chad-country-programme (dernière consultation le 07/04/2021).

Gebrekirstos, A., van Noordwijk, M., Neufeldt, H., Mitlöhner, R. (2010). Relationships of stable carbon isotopes, plant water potential and growth: an approach to assess water use

efficiency and growth strategies of dry land agroforestry species. Trees, 25(1), 95-102. https://doi.org/10.1007/s00468-010-0467-0

Gebrekirstos, A., Mitlöhner, R., Van Noordwijk, M., Bräuning, A. (2012). Tracing responses to climate variability from stable isotopes in tree rings of Anogeissus leiocarpus and Sclerocarya birrea from the Sahel zone, Burkina Faso. Trace, 10, 6-12. https://tree-ring.org/output/trace-publications/vol-10/

Gérard, J., Guibal, D., Cerre, J.-C., Paradis, S., *et al.* (2016). Atlas des bois tropicaux - Caractéristiques technologiques et utilisations. Versailles, France, Editions Quae, 1 002 p.

Guibal, D., Langbour, P., Gérard, J. (2015). Propriétés physiques et mécanique des bois. In : Mille Gilles (ed.), Louppe Dominique (ed.). Mémento du forestier tropical. Versailles : Ed. Quae, p. 873-884.

Habou, M. K. A., Rabiou, H., Abdou, L., Illiassou, S. A., Issoufou, A. A. E. S., Soumana, A., Mahamane, A. (2019). Germination et croissance des plantules d'une espèce fruitière indigène au Niger: *Balanites aegyptiaca* (L.) Del. International Journal of Biological and Chemical Sciences, 13(2), 693-703. https://doi.org/10.4314/ijbcs.v13i2.10

Hall, J. B. (1992). Ecology of a key African multipurpose tree species, Balanites aegyptiaca (Balanitaceae): the state-of-knowledge. Forest Ecology and management, 50(1-2), 1-30. https://doi.org/10.1016/0378-1127(92)90311-V

Hall, J. B. (2004). *Balanite aegyptiaca*. Enzyklopädie der Holzgewächse: Handbuch und Atlas der Dendrologie, 1-6. https://doi.org/10.1002/9783527678518

Hall, J. B., Walker, H. D. (1991) Balanites aegyptiaca: a monograph. School of Agriculture and Forest Sciences Publication Number 3. University of Wales, Bangor, 71 p.

Hart, J. H. (1989). The Role of Wood Exudates and Extractives in Protecting Wood from decay. Natural Products of Woody Plants T. II. R. J. W. Berlin, p. 861-880. https://doi.org/10.1007/978-3-642-74075-6_22

Ifticene-Habani, N., Abdoun, F. (2018). Croissance radiale et réponse au climat du pistachier de l'Atlas (Pistacia atlantica Desf.) dans le Parc national de Theniet El Had (Algérie). Bois et forêts des tropiques, 335, 3-13. https://doi.org/10.19182/bft2018.335.a31496

IPCC / Intergovernmental Panel on Climate Change (2014). Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the

Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (Eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf

IRAM (2019). Adaptation aux changements climatiques et renforcement de la résilience au Tchad - Diagnostic et perspectives. Document de travail provisoire, aout 2019, Caroline Broudic, Nadji Tellro Wai, Mahamat-Ahmat Abakar, Denis Michiels (IRAM), 125 p. https://www.reseau-far.com/wp-content/uploads/2019/09/adaptation-aux-changements-tchad.pdf

Jdaidi, N., Zouwawi, I., Hasnaoui, F., Naceur, B., Abbès, C., Torres Alvarez, E., Hasnaoui, B. (2014). Influence des variables climatiques sur la largeur des cernes de Merisier (Prunus avium) en Tunisie. Revue d'Ecologie, Terre et Vie, Société nationale de protection de la nature, 2014, 69 (3-4), 328-337. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03530722

Jodin, P. (Editor) (1994). Le Bois, matériau d'ingénierie. Arbolor, Nancy, 433 p.

Kant, T., Gour, V.S. (2012). Balanites aegyptiaca (L.). Del. A multipurpose and optional biodiesel tree species of arid region. International journal of science and Nature, 3(2): 472-475. https://www.semanticscholar.org/author/T.-Kant/30142999

Keller, R. (1993). Influence de quelques facteurs de la production sur la constitution du bois des arbres forestiers, Acta Botanica Gallica, vol. 140, n°4, p. 371-379. https://doi.org/10.1080/12538078.1993.10515609

Kini, L., (2018). Utilisation des gousses de *Faidherbia albida* (Del.) A. Chev dans l'alimentation des bovins en zones urbaine et péri-urbaine de la ville de Banfora (Burkina Faso). Mémoire de fin de cycle d'ingénieur du développement rural - option élevage, Institut du développement rural, Burkina Faso, 61p. http://bibliovirtuelle.u-naziboni.bf/biblio/opac_css/docnume/idr/environnement2/IDR-2018-KIN-LOU.pdf

Langbour, P., Paradis, S., Thibaut, B. (2019). Description of the Cirad wood collection in Montpellier, France, representing eight thousand identified species. Bois et Forêts des Tropiques, 339, 7-16. https://doi.org/10.19182/bft2019.339.a31709 https://doi.org/10.18167/DVN1/CDHU51

Cailloce, L. (2016). Le bois, matériau de demain. CNRS Le Journal, https://lejournal.cnrs.fr/articles/le-bois-materiau-de-demain. (dernière consultation le 07/04/2021).

Le Floc'h, E., Aronson, J. (2013). Les arbres des déserts : enjeux et promesses. Éditions Actes Sud, ISBN : 978-2-330-02381-2, 384 p.

Leclercq, A. (1977). Relation entre la croissance, la structure et la densité du bois de hêtre. Bull. Rech. Agron. Gembloux, vol. 12(4), p. 321-330.

Leclercq, A. (1983). Influence de la sylviculture sur la structure anatomique du bois de hêtre (*Fagus sylvatica* L). Bull. Rech. Agron. Gembloux, vol. 18 (3), p. 197-209.

Lenger, A., Pierson, J., Poncelet, J. (1999). Transformation, utilisation et industries du bois en Europe. Edition du Perron, Alleur-Liège, SBN/EAN : 978-2-87114-161-7, 557 p.

Macfarlane, C., Warren, C. R., White, D. A., & Adams, M. A. (1999). A rapid and simple method for processing wood to crude cellulose for analysis of stable carbon isotopes in tree rings. *Tree Physiology*, *19*(12), 831-835. https://doi.org/10.1093/treephys/19.12.831

Manise, T., Vincke, C. (2014). Impacts du climat et des déficits hydriques stationnels sur la croissance radiale du hêtre, du chêne, de l'épicéa et du douglas en Wallonie, Forêt Wallonne, n°129, p.48-57. http://hdl.handle.net/2078.1/144860

Mariaux, A. (1967). Les cernes dans les bois tropicaux africains. Nature et périodicité. Peuvent-ils révéler l'âge des arbres? Bois et Forêts des Tropiques, 113, 3-14 & 114, 23-37. https://revues.cirad.fr/index.php/BFT/article/view/19012 https://revues.cirad.fr/index.php/BFT/article/view/19006

Mariaux, A. (1969). La périodicité de formation des cernes dans le bois de Limba. Bois et Forêts des Tropiques, 128, 39‑54. https://revues.cirad.fr/index.php/BFT/article/view/19059

Mariaux, A. (1970). La périodicité de formation des cernes dans le bois de l'Okoumé. Bois et Forêt des Tropiques, 131, 37-50. https://revues.cirad.fr/index.php/BFT/article/view/19102

Mariaux, A. (1975). Essai de dendrochronologie en climat sahélien sur Acacia raddiana, Bois et Forêts des tropiques, 163, 25- 35. https://revues.cirad.fr/index.php/BFT/article/view/19246

Masseran, C., Mariaux, A. (1985). Anisotropie de retrait et structure du bois: recherche de l'influence des caractères morphologiques transverses des fibres. Bois et forêts des tropiques, 209, 35–47. https://revues.cirad.fr/index.php/BFT/article/view/19537

Mazet, J., Nepveu, G. (1991). Relations entre caractéristiques de retrait et densité du bois chez le pin sylvestre, le sapin pectiné et l'épicéa commun. Annals of Forest Science, 48, 87–100. https://doi.org/10.1051/forest:19910107

Mbaiguedem, M. (2012). Etude de vulnérabilité et adaptation des femmes rurales face aux changements climatiques : cas du Département du Chari au Tchad. Centre Régional Agrhymet. http://www.secheresse.info/spip.php?article61559

Mbow C. (2009). Potentiel et dynamique des stocks de carbone des savanes soudaniennes et soudano-guinéennes du Sénégal. Thèse de doctorat d'Etat ès sciences, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal, 319 p.

Mbow, C., Chhin, S., Sambou, B., Skole, D. (2013). Potential of dendrochronology to assess annual rates of biomass productivity in savanna trees of West Africa. Dendrochronologia, 31(1), 41-51. https://doi.org/10.1016/j.dendro.2012.06.001

McCarroll, D., Loader, N. J. (2004). Stable isotopes in tree rings. Quaternary Science Reviews, 23(7-8), 771-801. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2003.06.017

Messaoudene, M., Tessier, L. (1997). Relations cerne-climat dans des peuplements de Quercus afares Willd et Quercus canariensis Pomel en Algérie. Annales des Sciences forestières, INRA/EDP Sciences, 54 (4), 347-358. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00883153

Mignon, A., Do, F., (1999). ACFLOW - Un modèle d'analyse des transferts hydriques chez un acacia phréatophyte. Opération Acacia, Note technique n°3, IRD Centre de Hann, Dakar, 25p. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/num-dakar-02/010020525.pdf

Mohammed, N. E. A. A. (2019). Relationship between Anatomical Properties and some Physical and Mechanical properties for Five Wood Species Growing in North Darfur Sudan. Doctoral dissertation, Sudan University of Science & Technology. http://repository.sustech.edu/handle/123456789/23688.

Mothe, F., Duchanois, G., Zannier, B., Leban, J. M. (1998). Analyse microdensitométrique appliquée au bois: méthode de traitement des données utilisée à l'Inra-ERQB (programme Cerd). Annales des sciences forestières, INRA/EDP Sciences, 55 (3), 301-313. https://doi.org/10.1051/forest:19980303

Moussa, M., Mahamane, L., Gebrekirstos, A., Abasse, T. (2020). Wood Anatomy and Response to Climate Variability of Faidherbia albida and Prosopis africana Using Dendrochronology in the Sahelian Agroforestry Parklands. In Agroforestry for Degraded Landscapes (pp. 371-388). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6807-7_13

MHUR / Ministère de l'hydraulique urbaine et rurale (2012). La seconde communication nationale du Tchad sur les changements climatiques. https://unfccc.int/resource/docs/natc/tcdnc2.pdf

Ndiaye, D., Sagna, M. B., Diallo, A., Diatta, S., Peiry, J. L., Guisse, A. (2020). Analyse de la structure morphologique des cernes de croissance et détermination des âges de deux espèces sahéliennes : *Acacia tortilis* (Forsk.) *Hayne ssp. raddiana* (savi) *Brenan, Acacia senegal* (L.) *Willd*. European scientific journal, 2020, 16 (6), 168-187. https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n6p168

Nepveu, G. (1995). La modélisation de la qualité du bois en fonction des conditions de croissance : définitions et objectifs, entrées nécessaires, sorties possibles. Revue forestière française, AgroParisTech, 61 (S), 35-44. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-0344442

National Research Council (1983). Firewood Crops: Shrub and Tree Species for Energy Production: volume 2. Washington, DC, the National Academies Press, 101 p. https://doi.org/10.17226/19480

Okia, C. A. (2010). *Balanites aegyptiaca:* A Resource for Improving Nutrition and Income of Dryland Communities in Uganda. PhD thesis, School of Environment, Natural Resources and Geography, Bangor University, Bangor, U K. 310 pp.

Panshin, A. J., Zeeuw De, C. (1980): Textbook of Wood Technology*:* Structure, Identification, Properties, and Uses of the Commercial Woods of the United States and Canada. New York, McGraw-Hill Education, 722 p.

Parkan, J. (1993). Le Balanites. In: Le Flamboyant - spécial arbres du mois, n°27, 39 p.

Pliura, A., Yu, Q., Zhang, S. Y., MacKay, J., Périnet, P., Bousquet, J. (2005). Variation in Wood Density and Shrinkage and Their Relationship to Growth of Selected Young Poplar Hybrid Crosses. Forest Science, 51(5), 472-482.

Polge, H. (1972). Quantitative radiography and the densitometric analysis of wood. Wood Science, 5, 51-59.

Ravaoherinavalona, R., Roger, E., Rakouth, B. Ravaomanalina, B. R. (2020). Etudes dendrométrique et dendrochronologique de trois espèces de *Cedrelopsis* Baillon (Rutaceae) dans les forêts sèches de l'Ouest de Madagascar. Malagasy Nature, 14: 24-37. http://www.vahatra.mg/volume14/MN14_02_Ravaoherinavalona.pdf

Rosner, S, Klein, A, Muller, U, Karlsson, B. (2008). Tradeoffs between hydraulic and mechanical stress responses of mature Norway spruce trunk wood. Tree Physiology 28, 1179-1188. https://doi.org/10.1093/treephys/28.8.1179

Ross, J. H. (1966). *Acacia albida* Del. in Africa. Bol. Soc. Brot, 40, 187-205.

Roupsard, O., Ferhi, A., Granier, A., Pallo, F., Depommier, D., Mallet, B., Joly, H.I., Dreyer, E., (1998). Fonctionnement hydrique et profondeur de prélèvement de l'eau de Faidherbia albida dans un parc agroforestier soudanien. L'Acacia au Sénégal. Eds. C. Nef Campa, S. Hamon and C. Grignon. Collection Colloques and Séminaires, ORSTOM Editions, Paris, 81-103. https://hal.inrae.fr/hal-02770538

Roupsard, O., Ferhi, A., Granier, A., Pallo, F., Depommier, D., Mallet, B., Joly, H.I., Dreyer E. (1999). Reverse phenology and dry-season water uptake by *Faidherbia albida* (Del.) A. Chev. In an agroforestry parkland of Sudanese west Africa. Functionnal Ecology, 13(4), 460–472. https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.1999.00345.x

Sarmoum, M., Guibal, F., Abdoun, F. (2016). Effet des facteurs stationnels sur la croissance radiale et la réponse du pin d'Alep au climat dans le massif de l'Ouarsenis, Algérie. *Bois et Forêts des Tropiques*, 329 (3), 17-27. https://doi.org/10.19182/bft2016.329.a31308

Segla, K. N., Kokutse, A. D., Adjonou, K., Langbour, P., Chaix, G., Guibal, D., Kokou, K. (2015). Caractéristiques biophysiques du bois de *Pterocarpus erinaceus* (Poir.) en zones guinéenne et soudanienne au Togo. Bois et Forêts des Tropiques, 324 (2), 51-64. https://doi.org/10.19182/bft2015.324.a31266

Sileshi, G. W. (2016). The magnitude and spatial extent of influence of *Faidherbia albida* trees on soil properties and primary productivity in drylands. Journal of Arid Environments, 132, 1-14. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.03.002

Sircoulon, J. (1976). La récente sécheresse des régions sahéliennes. La Houille Blanche, vol 62, issue 6-7, 537-548. https://doi.org/10.1051/lhb/1976036

Sultan, B., Dardel, C., Guichard, F., Kergoat, L., Lebel, T., Peugeot, C., Weigel, J.Y., Sinaba, F. (2015). Zones semi-arides : le Sahel sensible aux variations de pluie. In Reinert M., Janicot Serge (ed.), Aubertin Catherine (ed.), Bernoux Martial (ed.), Dounias Edmond (ed.), Guégan Jean-François (ed.), Lebel Thierry (ed.), Mazurek Hubert (ed.), Sultan Benjamin (ed.), Sokona Y. (pref.), Moatti Jean-Paul (pref.) Changement climatique : quels défis pour le Sud ? Marseille: IRD, 115-127, ISBN 978-2-7099-2168-8.

https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers19-02/010069538.pdf

Tarhule, A., Hughes, M.K. (2002). Tree-ring research in semi-arid west Africa: Need and potential. Tree-Ring Research, 58 (1/2), 31-46. http://hdl.handle.net/10150/262542

Thibaut, B. (2016). Tree biomechanics and the transition from juvenile to mature wood. IAWS Annual Conference, Wood Science for the Future, Paris, France, 1-3 June 2016, 20 p. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01784796

Till, C. (1986). L'influence des facteurs écologiques sur l'épaisseur des cernes du Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* (End.) Carrière) au Maroc. *Ecologia mediterranea* XII (3-4), p. 33-47. https://www.persee.fr/doc/ecmed_0153-8756_1986_num_12_3_1172

Traoré, B. (2009) Influence de la structure anatomique et des métabolites secondaires sur les propriétés physiques et la qualité acoustique du bois de vène (*Pterocarpus erinaceus* Poir.) provenant du Mali. Thèse de Doctorat, Département des Sciences du Bois et de la Forêt, Université Laval, Québec, Canada, 206 p. http://hdl.handle.net/20.500.11794/21319

Von Maydell, H. J., Brase, J. (1986). Trees and shrubs of the Sahel, their characteristics and uses. Eschborn [Germany]: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, issue 196, 525 p. https://permaculture-sans-frontieres.org/en/books-fr-eng-trees-and-shrubs-of-the-sahel-von-maydell

Weber J. C., Montes C. S. (2010). Correlations and clines in tree growth and wood density of *Balanites aegyptiaca* (L.) Delile provenances in Niger. New Forests, 39 (1): 39-49. https://link.springer.com/article/10.1007/s11056-009-9153-8

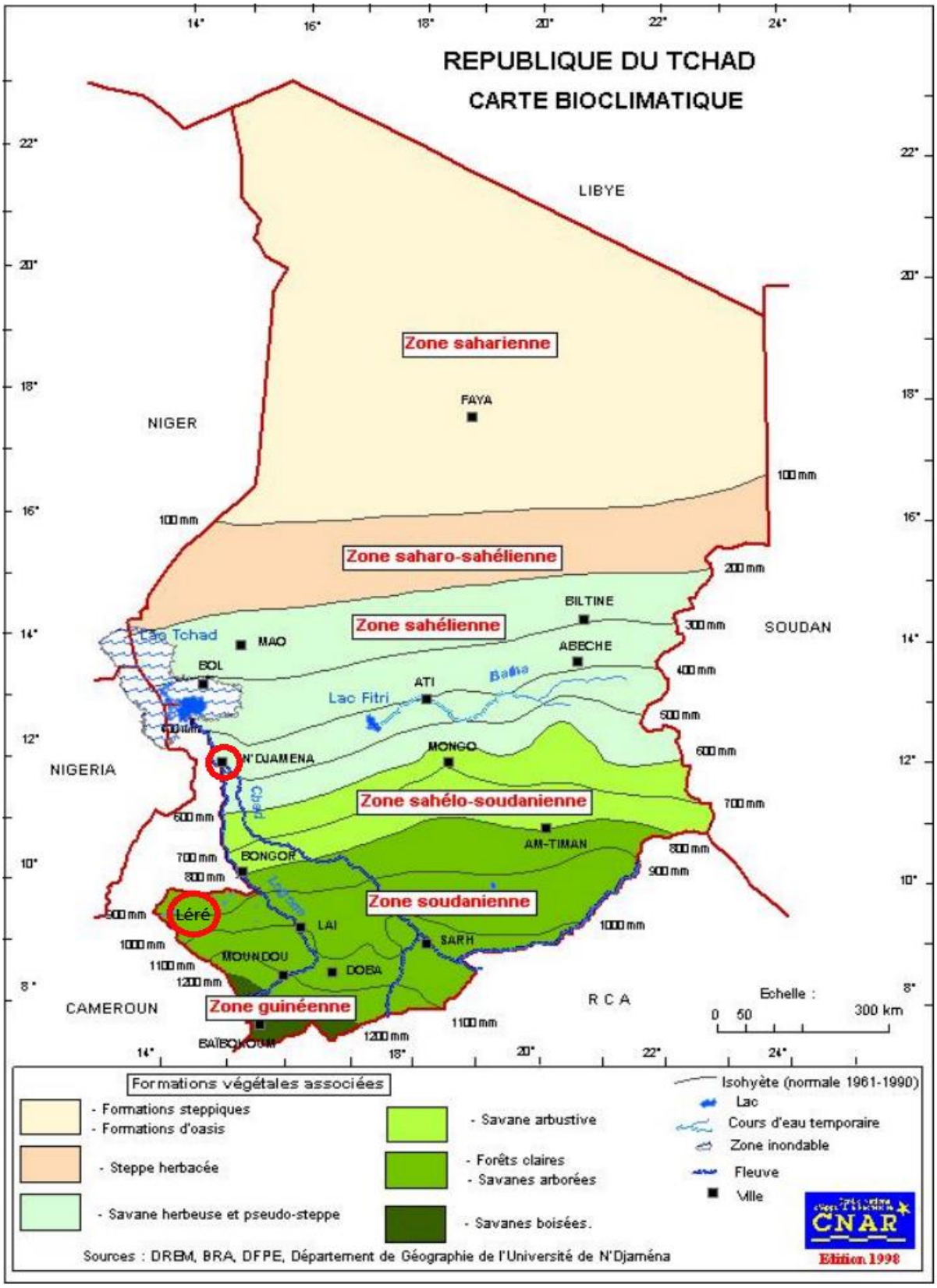
Worbes M. (1989). Growth rings, increment and age of trees in inundation forests, savannas and a mountain forest in the Neotropics. IAWA Bull. n.s., 10(2), 109-122. https://brill.com/view/journals/iawa/10/2/article-p109_3.xml?language=en

Yengwe, J., Gebremikael, M. T., Buchan, D., Lungu, O., De Neve, S. (2018). Effects of *Faidherbia albida* canopy and leaf litter on soil microbial communities and nitrogen mineralization in selected Zambian soils. Agroforestry systems, 92(2), 349-363. https://doi.org/10.1007/s10457-016-0063-4

Zhang, S. H., Romane, F. (1991). Variations de la croissance radiale de *Quercus ilex* L. en fonction du climat. Annales des sciences forestières, vol. 48, n°2, 225-234. https://www.afs-journal.org/articles/forest/pdf/1991/02/AFS_0003-4312_1991_48_2_ART0009.pdf

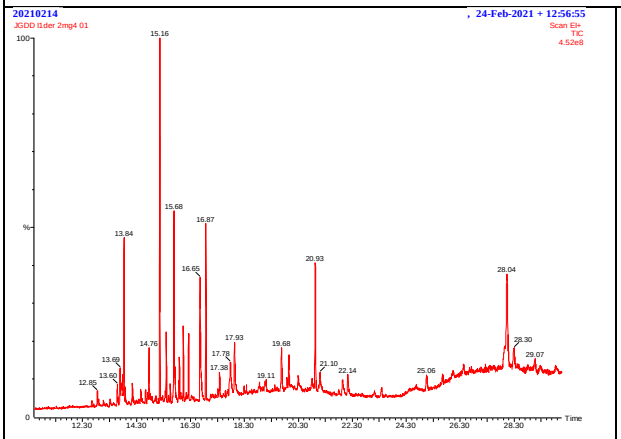
7 Annexes

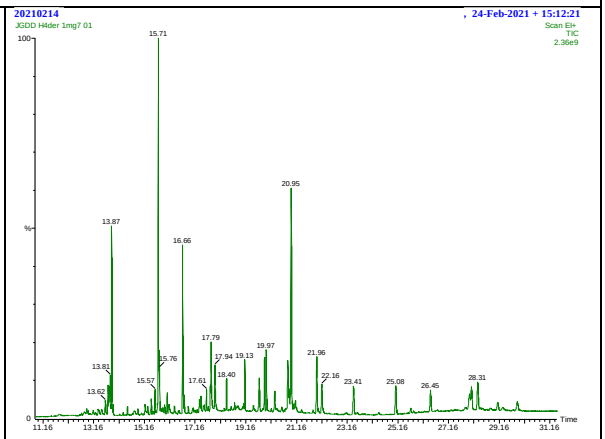
1. Carte bioclimatique du Tchad

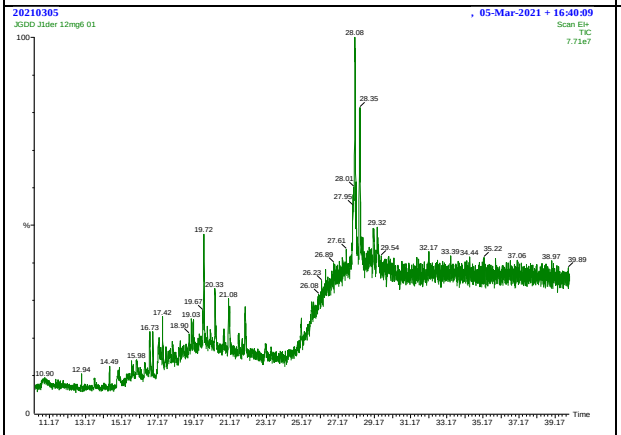


2. Chromatogrammes issus des analyses GC-MS

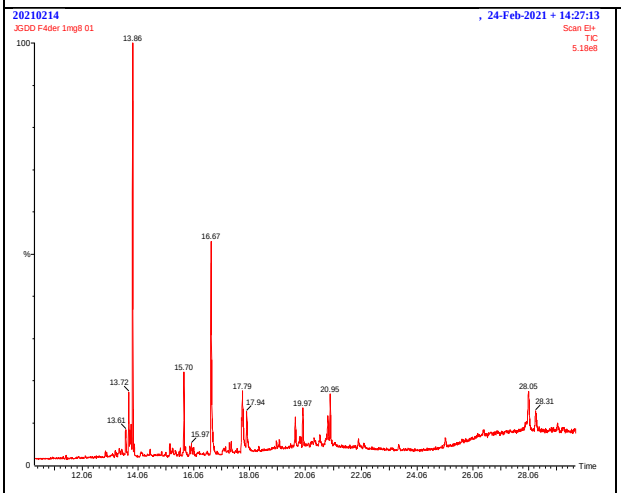
Faidherbia albida zone sahélienne tchadienne

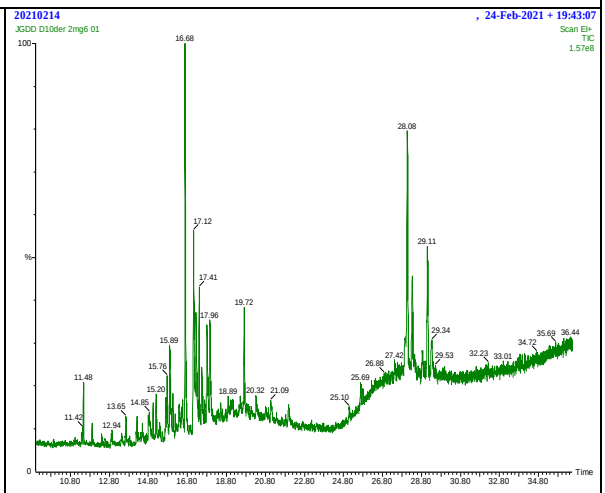


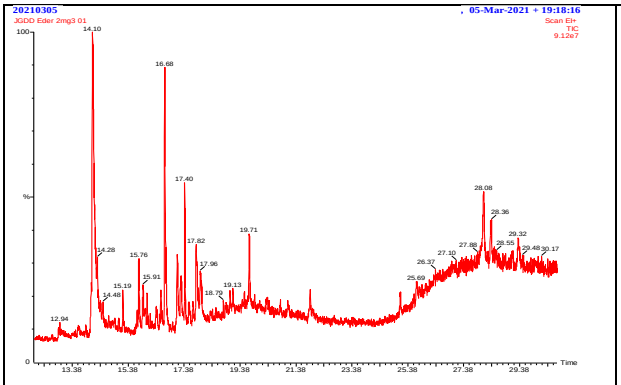




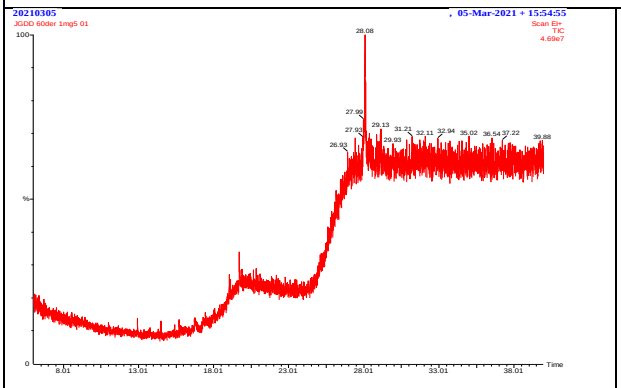
Faidherbia albida zone soudanienne tchadienne

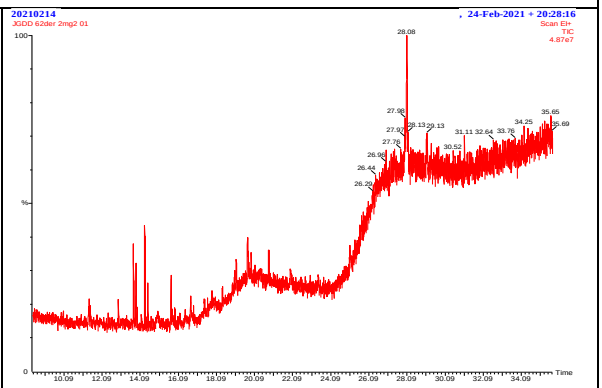


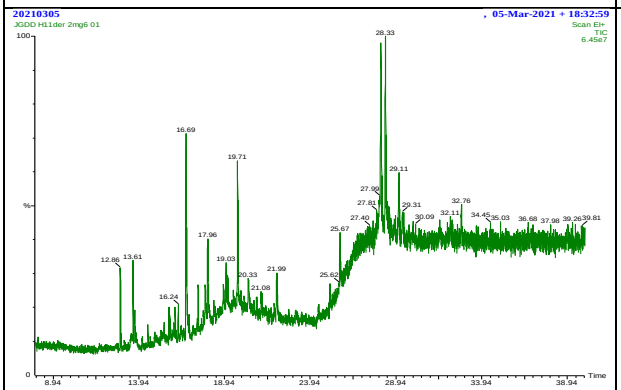




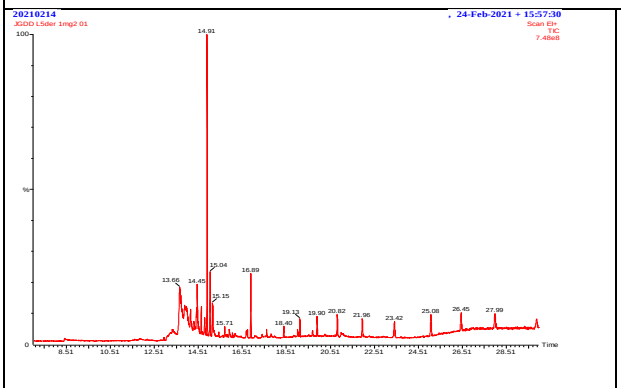
***Faidherbia albida* zone sahélienne sénégalaise**

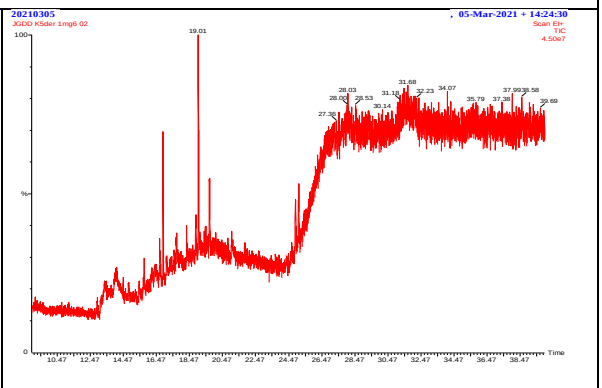




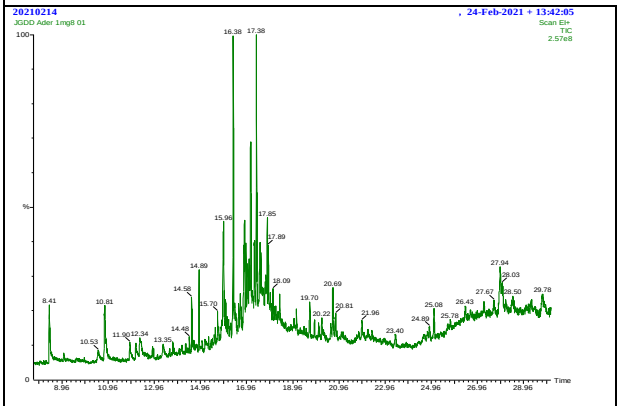


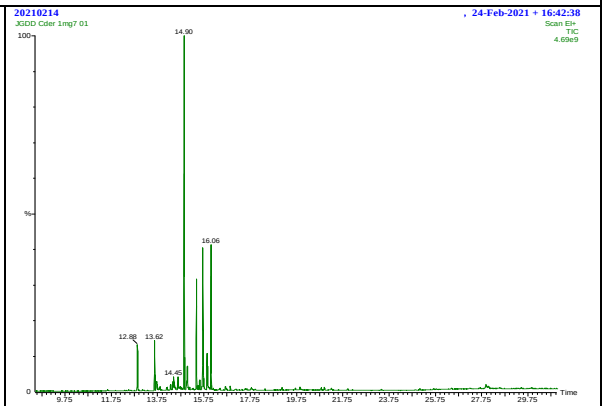
***Balanites aegyptiaca* zone sahélienne tchadienne**

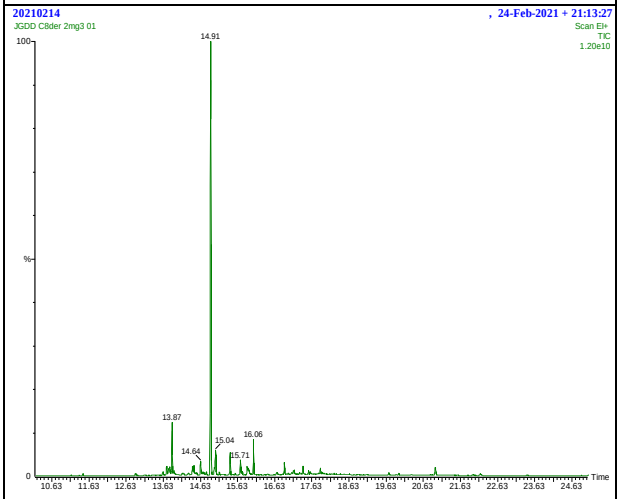


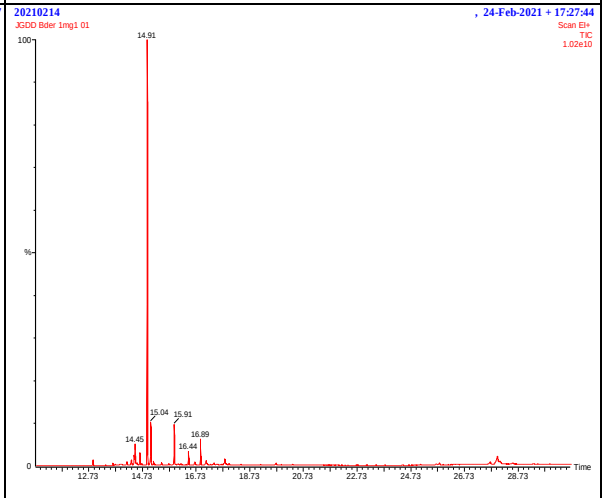


Balanites aegyptiaca zone soudanienne tchadienne

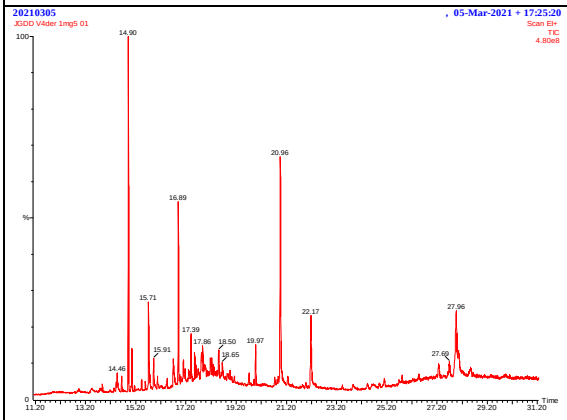


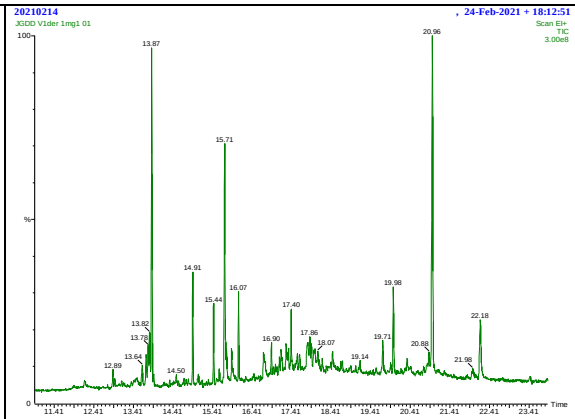


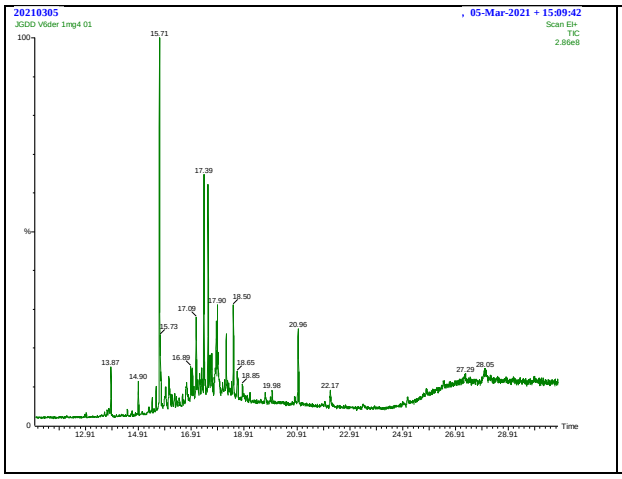




Balanites aegyptiaca zone sahélienne sénégalaise

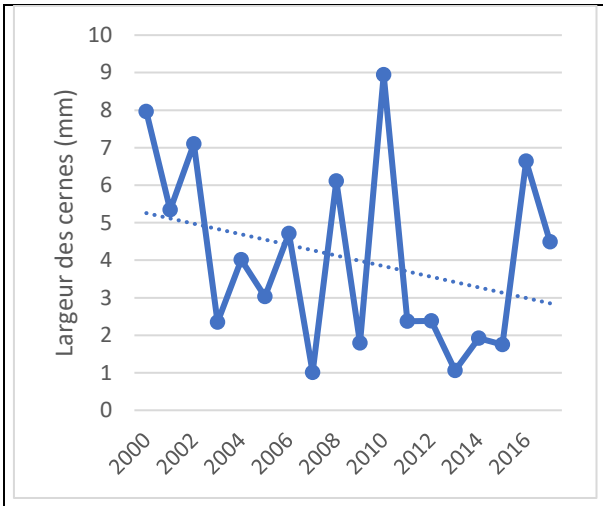




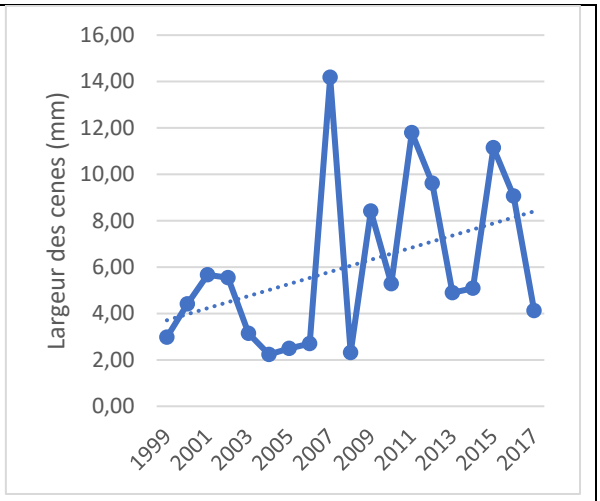

20210305
, 05-Mar-2021 + 15:09:42
JGDD V6der 1mg4 01
Scan EI+
TIC
2.86e8
100
%
0
15.71
17.39
17.08
17.90
18.50
15.73
16.89
18.65
18.85
19.98
20.96
13.87
14.90
22.17
27.29
28.05
12.91
14.91
16.91
18.91
20.91
22.91
24.91
26.91
28.91
Time

3. Croissance et régression linéaire

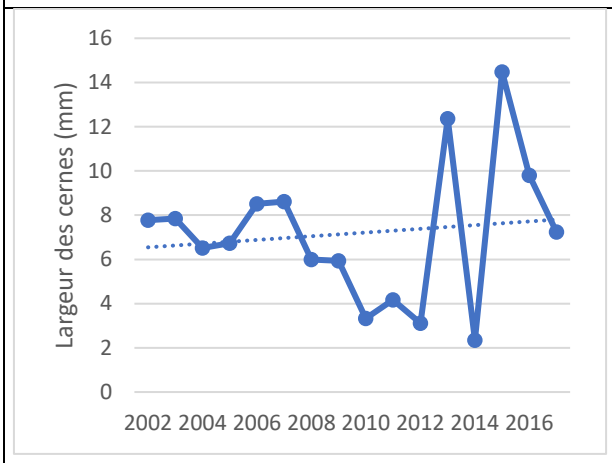
3.1. Croissance de la moelle vers l'écorce



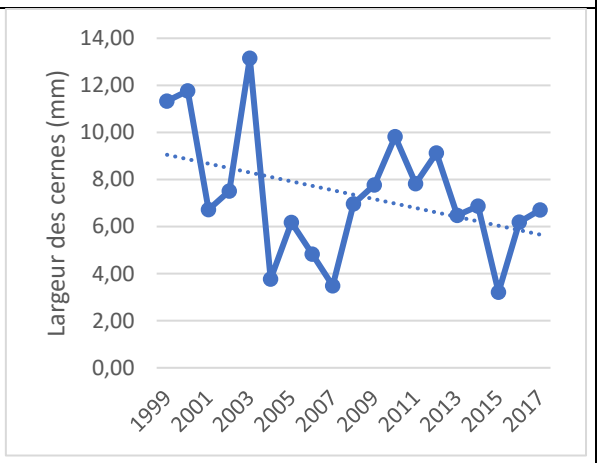
Balanites aegyptiaca ''BE1'' zone sahélienne.



Faidherbia albida ''FN'' zone sahélienne.

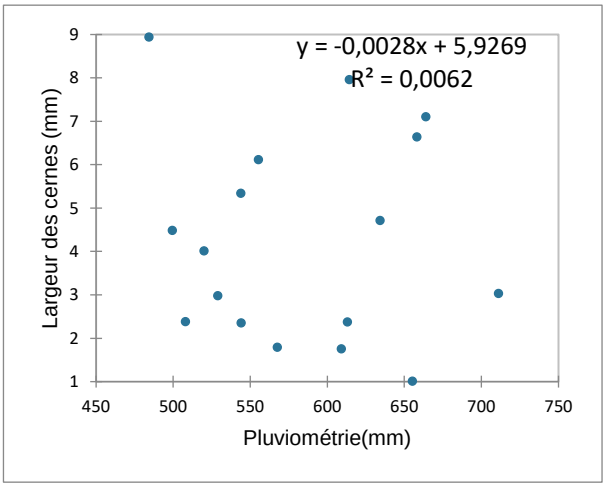


Balanites aegyptiaca ''B3'' zone soudanienne.

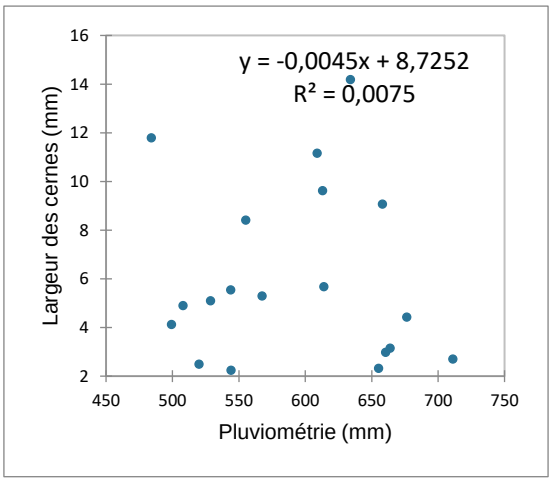


Faidherbia albida ''F1'' zone soudanienne.

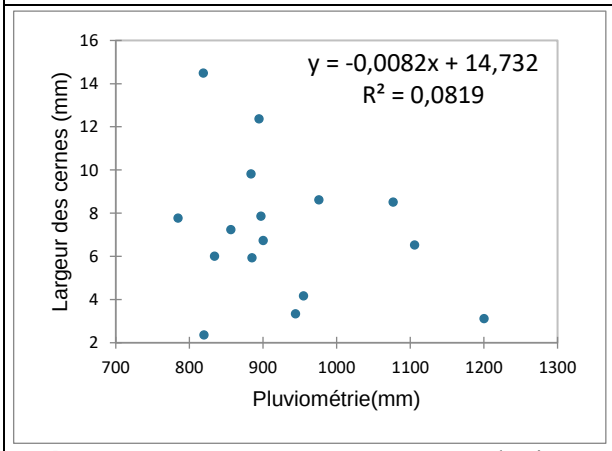
3.2. Régression linéaire entre la largeur des cernes et la pluviométrie



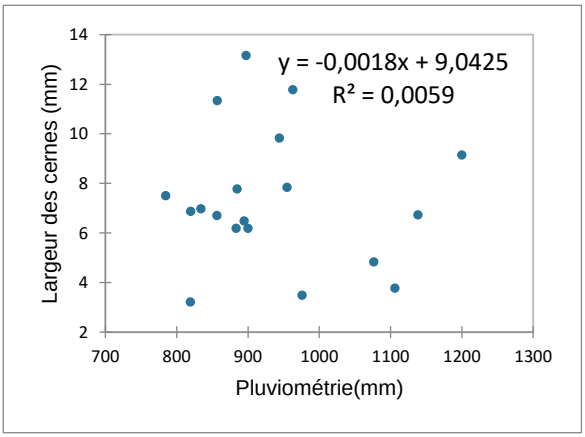
Balanites aegyptiaca ‘‘BE1’’ zone sahélienne.



Faidherbia albida ‘‘FN’’ zone sahélienne.

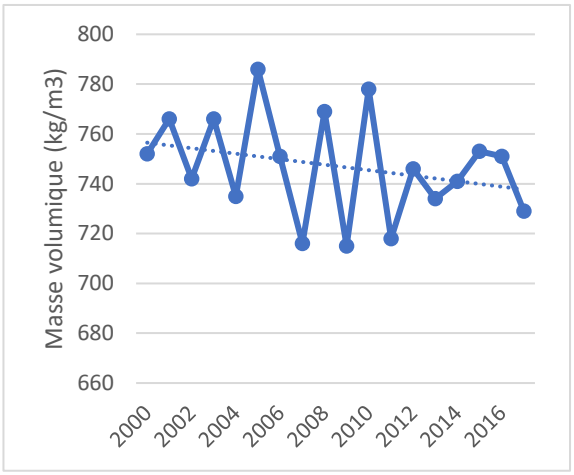


Balanites aegyptiaca ‘‘B3’’ zone soudanienne.

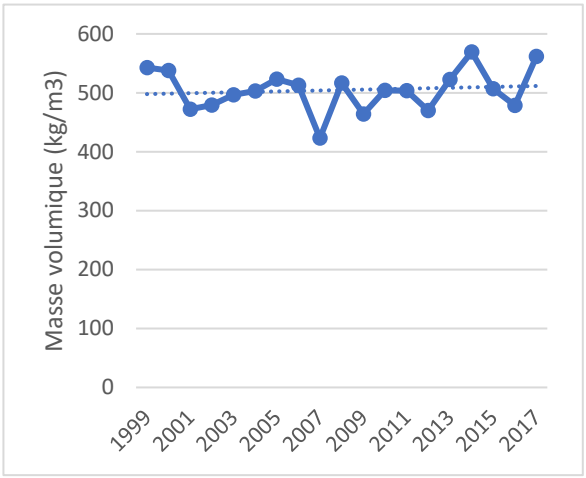


Faidherbia albida ‘‘F1’’ zone soudanienne.

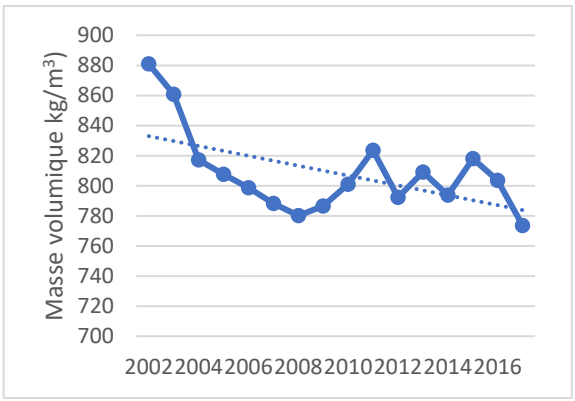
3.3. Masse volumique de la moelle vers l'écorce



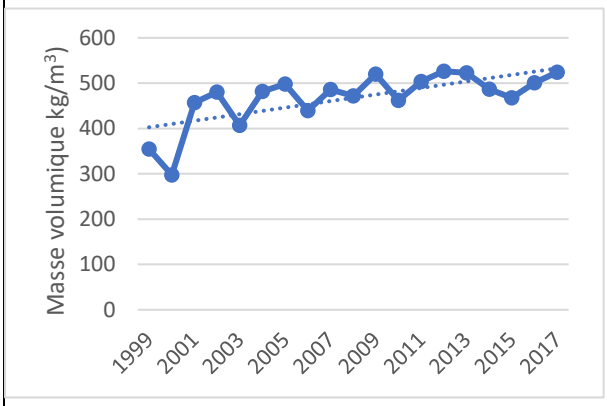
Balanites aegyptiaca ''BE1'' zone sahélienne.



Faidherbia albida ''FN'' zone sahélienne.

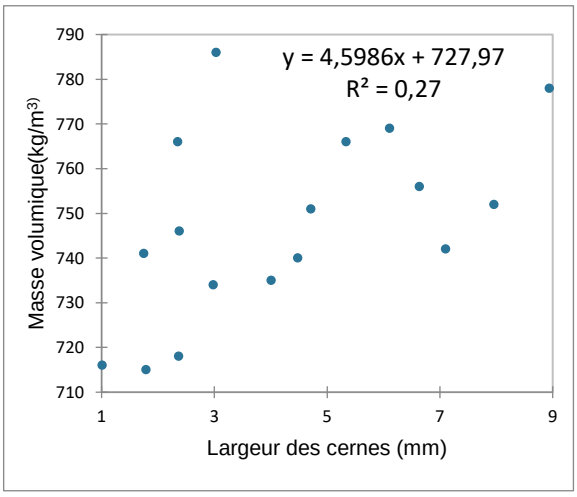


Balanites aegyptiaca ''B3'' zone soudanienne.

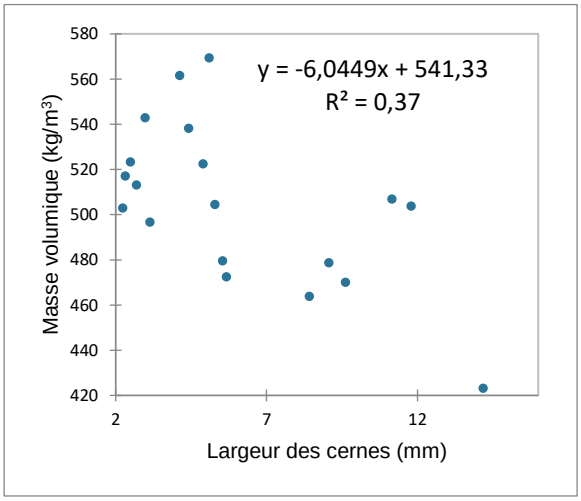


Faidherbia albida ''F1'' zone soudanienne.

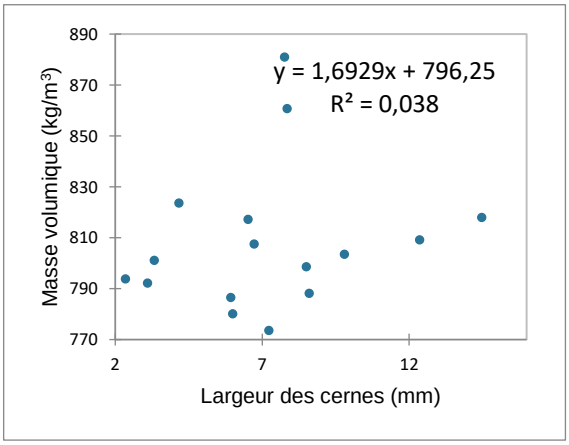
3.4. Régression linéaire entre la largeur des cernes et la masse volumique



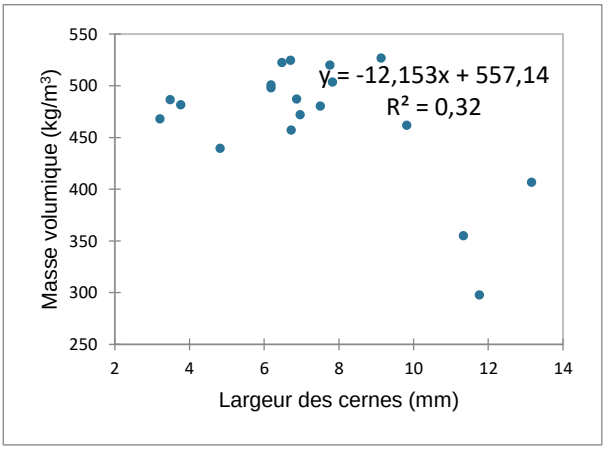
Balanites aegyptiaca ‘‘BE1’’ zone sahélienne.



Faidherbia albida ‘‘FN’’ zone sahélienne.

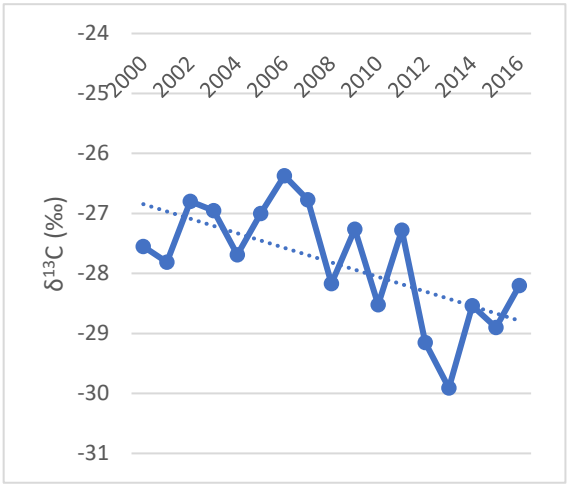


Balanites aegyptiaca ‘‘B3’’ zone soudanienne.

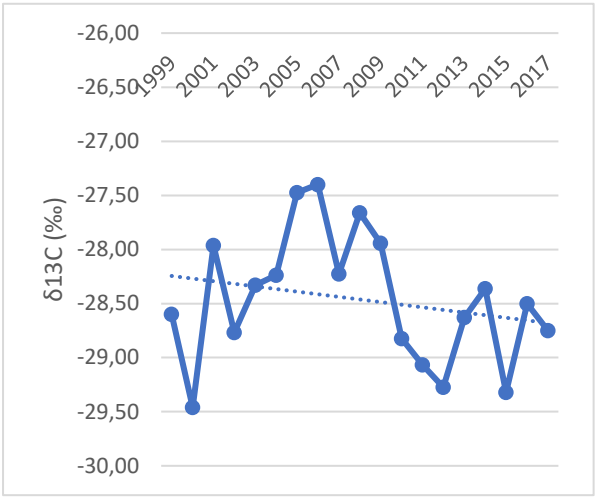


Faidherbia albida ‘‘F1’’ zone soudanienne.

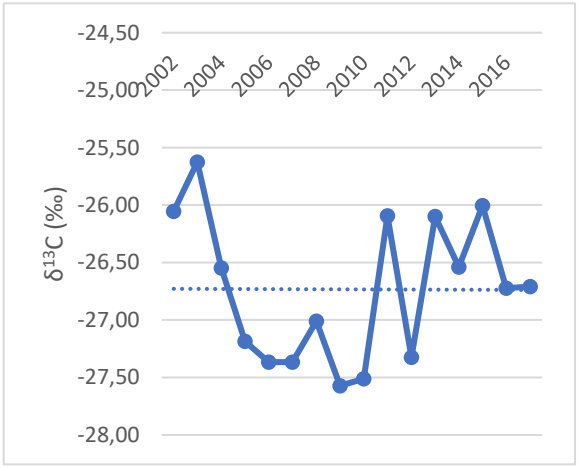
3.5. Evolution de $\delta^{13}C$ de la moelle vers l'écorce



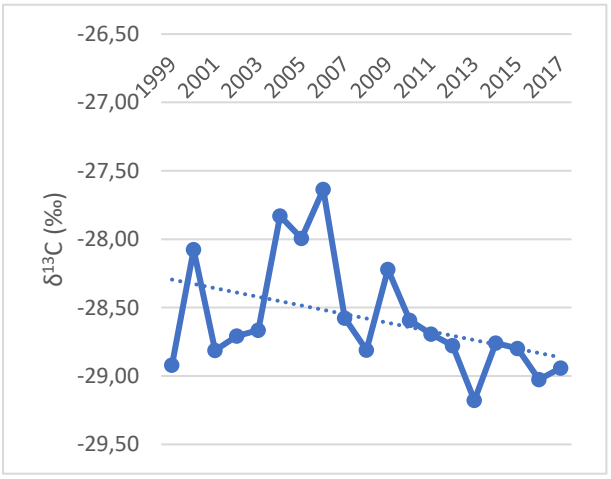
Balanites aegyptiaca ''BE1'' zone sahélienne.



Faidherbia albida ''FN'' zone sahélienne..

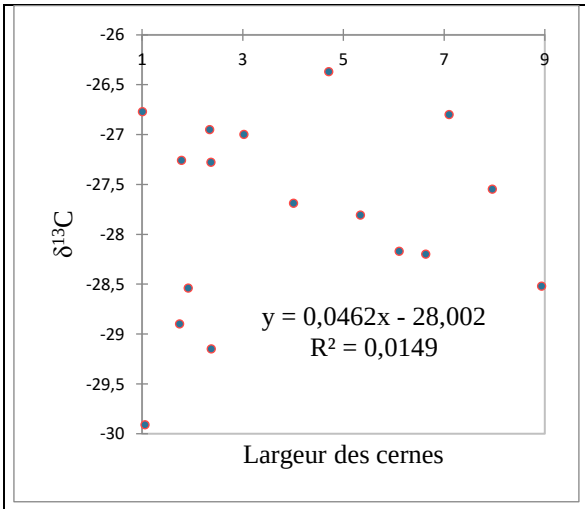


Balanites aegyptiaca ''B3'' zone soudanienne.

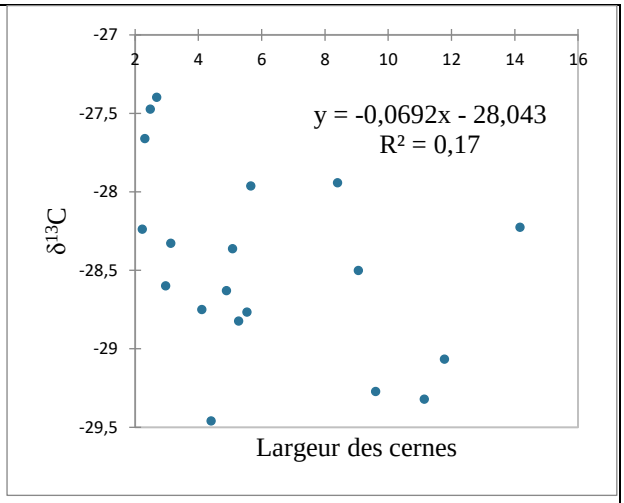


Faidherbia albida ''F1'' zone soudanienne.

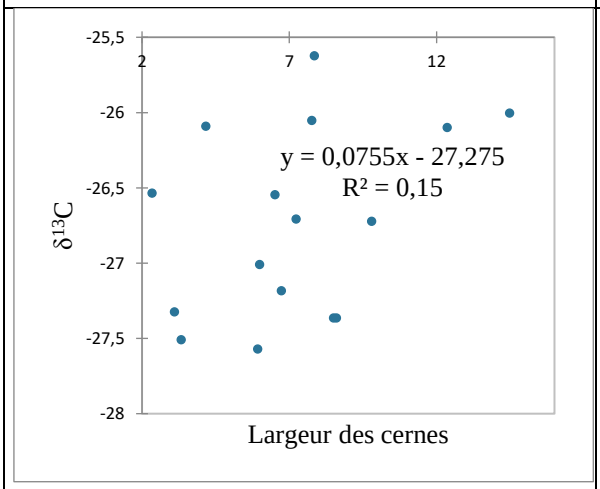
3.6. Régression linéaire entre la largeur des cernes et $\delta^{13}C$



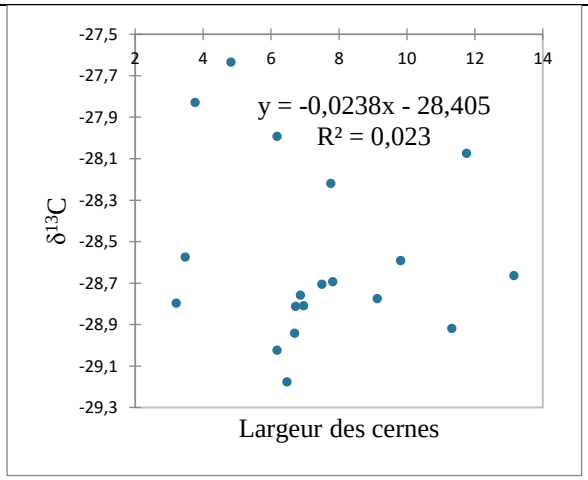
Balanites aegyptiaca ‘‘BE1’’ zone sahélienne.



Faidherbia albida ‘‘FN’’ zone sahélienne.



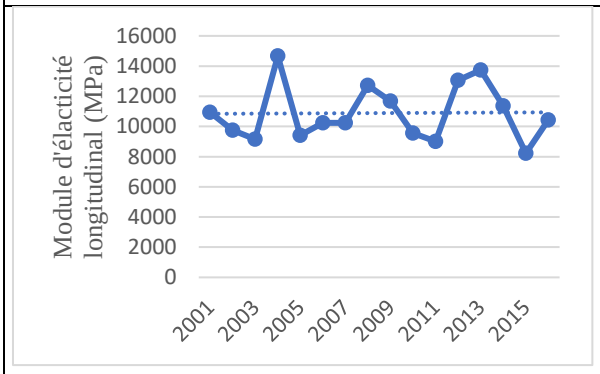
Balanites aegyptiaca ‘‘B3’’ zone soudanienne.

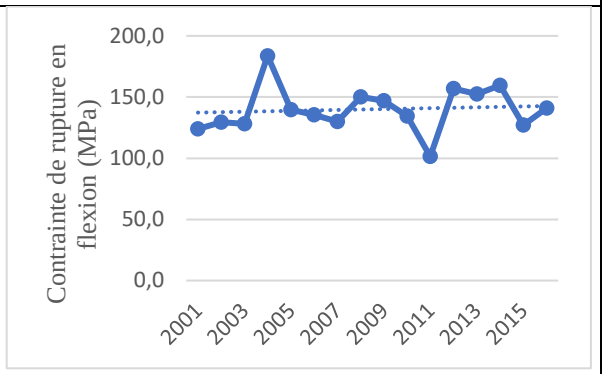


Faidherbia albida ‘‘F1’’ zone soudanienne.

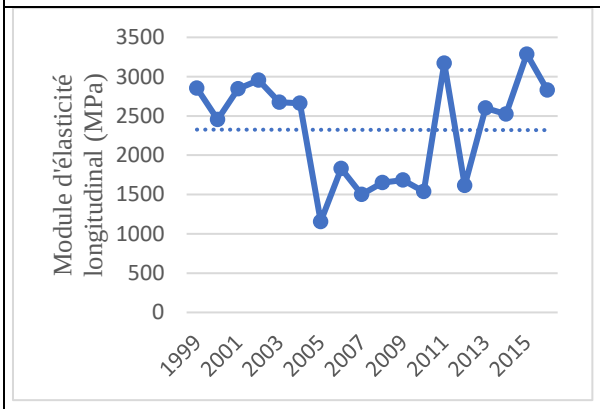
3.7. Evolution du module d'élasticité longitudinal et la contrainte de rupture en flexion de la moelle vers l'écorce

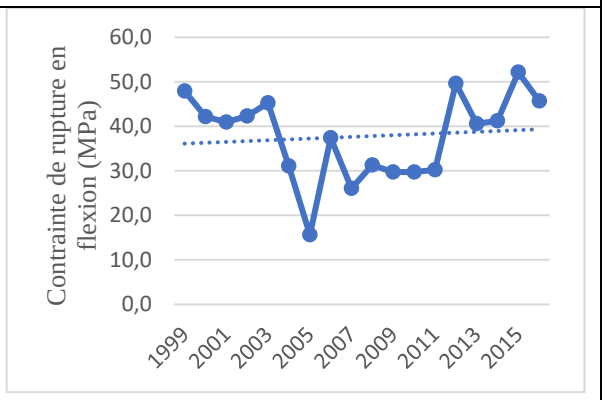
Balanites aegyptiaca ''BE1'' zone sahélienne





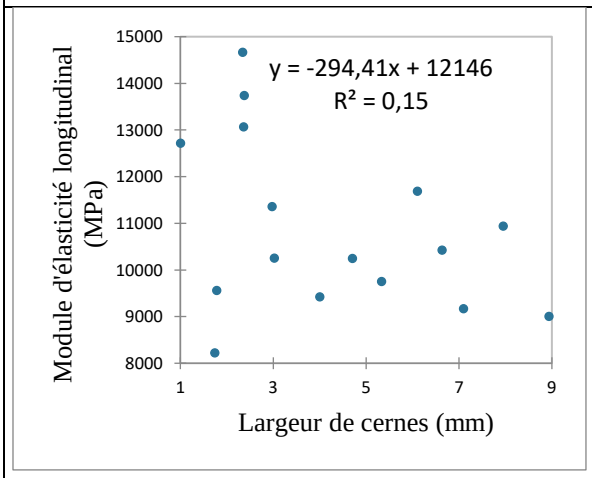
Faidherbia albida ''FN'' zone sahélienne

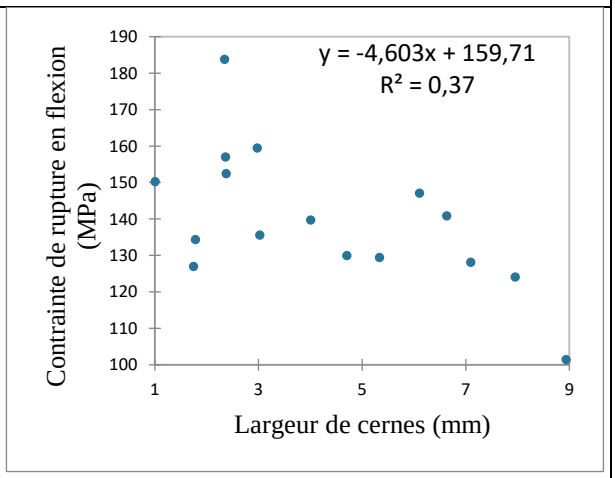




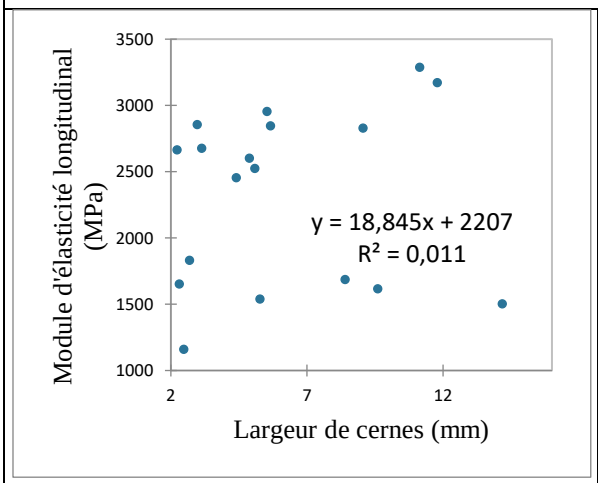
3.8. Relation entre la largeur de cernes et module d'élasticité longitudinal, et la largeur de cernes et contrainte de rupture en flexion

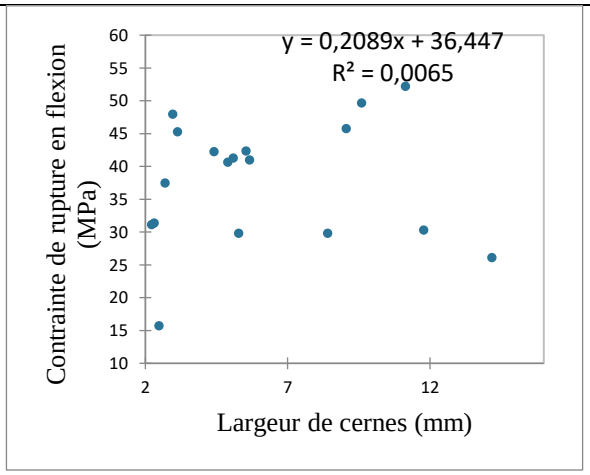
Balanites aegyptiaca ''BE1'' zone sahélienne





Faidherbia albida ''FN'' zone sahélienne





8 Articles publiés

Influence du changement climatique sur les propriétés physiques et mécaniques du bois d'essences des zones semi-arides tchadiennes

DOUGABKA Dao[1, 2], GERARD Jean[1], GUIBAL Daniel[1], TIKRI Bianzeubé[2]

[1]UR BioWooEB, CIRAD
[2]Université polytechnique de Mongo (Tchad)
dougabkadao@yahoo.fr

Mots clefs : bois ; changement climatique; propriétés physiques ; propriétés mécaniques ; zone semi-aride ; Tchad.

Contexte et objectifs :

Le bois est un matériau hygroscopique anisotrope dont les propriétés dépendent du milieu environnemental et de ses conditions de croissance. Plusieurs études (Aussenac, 1978, Keller, 1993 ; Aussenac, 2000 ; Manise et Vincke, 2014) ont montré l'influence des précipitations et de la température sur la croissance de l'arbre. Au début du 20ème siècle, on a commencé à observer une augmentation de la température moyenne à la surface du globe (Cassou, 2004). Cette augmentation due à l'émission excessive des gaz à effet de serre dans l'atmosphère s'est accentuée durant les deux dernières décennies, obligeant de nombreuses espèces à s'adapter, ou les condamnant à disparaitre. En France, la canicule de 2003 avait eu des conséquences sur une grande variété d'essences (Lebourgeois, 2005), entre autres et de façon très visible les roussissements précoces des feuilles en milieu d'été et leur chute prématurée.

Dans un pays sahélien comme le Tchad (avec ses trois grandes zones climatiques : désertique, sahélienne et soudanienne) naturellement exposé aux aléas climatiques et faisant face au problème de désertification et de déforestation, les conséquences du changement climatique ne sont plus à démontrer. Les Hommes, les animaux et les végétaux subissent de plein fouet les effets de ce changement. Pour les plantes, on assiste à trois phénomènes visibles dus à ce changement : la mortalité accrue de certaines espèces, l'adaptation due peut-être à un changement de fonctionnement physiologique, voire génétique, et la migration. Face à ces adaptions et migrations, les bois verront logiquement leurs propriétés technologiques modifiées, impactant ainsi la qualité des objets fabriqués. Pour preuve, les usagers des bois de chauffe, charbon de bois et objets fabriqués avec les bois tchadiens se plaignent depuis plusieurs années de la diminution de leur pouvoir calorifique et de leur tenue mécanique. Il est à noter qu'avant l'interdiction d'exploitation des forêts au Tchad en 2008, les bois étaient utilisés dans une large gamme d'emplois : source d'énergie (bois de chauffe et charbon de bois), fabrication d'équipements et ustensiles de cuisine (mortier, pilon, banc, spatule, planche à couper…), pirogues, objets d'arts et instruments de musique (balafon, cithare…).

En conséquence, on est amené à se poser des questions sur les modifications des propriétés des bois dues à leur adaptation au changement climatique, surtout dans un pays comme le Tchad qui présente déjà des conditions climatiques extrêmes.

Ces travaux de recherche ont donc comme objectif de comprendre l'adaptation d'essences tchadiennes face à ce changement afin d'identifier les moins sensibles au stress et celles qui présentent les plus meilleures potentialités économiques pour une valorisation. Afin de pouvoir travailler de façon comparative, nous allons étudier des essences non spécifiques au Tchad et aussi disponibles dans d'autres pays de la région.

Matériel et méthode

Cette étude portera dans un premier temps sur deux essences de bois, *Faidherbia albida* (*Acacia albida*) et *Balanites aegyptiaca* (appelé Savonnier au Tchad) dont des échantillons ont été prélevés dans deux zones climatiques différentes du pays, la zone sahélienne (région de N'Djamena) et la zone soudanienne (région de Léré). Le choix de ses essences se justifie par leur répartition sur la grande majorité des zones climatiques tchadiennes, par l'importance qu'attache la population locale à ses espèces, et par leurs nombreux usages en bois d'œuvre au Tchad. Du fait de restrictions relatives aux coupes de bois au Tchad, nous avons volontairement limité la taille de l'échantillonnage. Pour chacune des deux essences et par zone climatique, nous avons prélevé dans un premier temps trois arbres, soit un total de six *Faidherbia albida* et six *Balanites aegyptiaca*.

Le prélèvement des échantillons s'est effectué en abattant chaque arbre à 50 cm au-dessus du sol (fig.1). Sur chaque tronc coupé, un billon d'environ 1 m de longueur a été prélevé. Ces billons ont ensuite été sciés en plateaux de longueur 60 cm (purge de 20 cm de part et d'autre du billon) et d'épaisseur 8 cm qui ont ensuite été séchés à l'air (fig.2). Des plateaux de 50 cm de longueur finale et de 6 cm d'épaisseur seront acheminés au CIRAD de Montpellier pour les essais.

Fig.1 : Prélèvement de troncs

Fig.2 : Plateaux en cours de séchage

Les essais à réaliser concerneront dans un premier temps les propriétés physiques et mécaniques de référence des essences choisies. Les caractéristiques à déterminer seront les suivantes : taux d'humidité, retraits de séchage, densité, infradensité, point de saturation des fibres, module d'élasticité, contrainte de rupture en flexion et en compression. Dans un second temps, nous procèderons à une étude dendrochronologique en faisant le lien entre les données climatiques et la largeur des cernes. Nous étudierons ensuite de façon comparative les propriétés physiques et mécaniques en fonction de la croissance des arbres.

Résultats à venir

Les premiers résultats à obtenir porteront sur les propriétés physiques des bois de *Faidherbia albida* issus de la zone climatique soudanienne tchadienne. Les propriétés dans un premier temps étudiées seront le taux d'humidité du bois, les retraits de séchage, la densité à 12% d'humidité et l'infradensité. Elles seront comparées aux résultats obtenus dans le cadre de la seule étude actuellement disponible portant sur les propriétés technologiques de cette essence (Giffart, 1971) ; pour cette étude, les échantillons étudiés étaient prélevés dans la zone soudanienne sénégalaise ; les résultats de cette étude ont montré que *Faidherbia albida*, bien qu'utilisé comme bois d'œuvre au Sénégal, présentait des propriétés technologiques d'un

intérêt limité, bien que des expériences complémentaires soient apparues nécessaires pour confirmer ce résultat.

Références

Aussenac G. (1978). La sécheresse de 1976 : influence des déficits hydriques sur la croissance des arbres forestiers, Revue Forestière Française, vol.2, p.103-113.

Aussenac G. (2000). Interactions between forest stands and microclimate: ecophysiological aspects and consequences for silviculture, Annals of Forest Science, vol. 57, no 3, p. 287-301

Breda N., Granier A., Aussenac G. (2000). Evolutions possibles des contraintes climatiques et conséquences pour la croissance des arbres, Revue Forestière Française, Vol. LII, p.73-90.

Breda N., Granier A., Aussenac G. (2004). La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiologique et influence sur les arbres forestiers, Revue Forestière Française, Vol. LVI, no 2, p.109-131.

Cassou C. (2004). Du changement climatique aux régimes de temps : l'oscillation nord-atlantique, La Météorologie, vol.45, p.21-32

Giffard P.L. (1971). Recherches complémentaires sur Acacia albida (Del), Bois et Forêt des Tropiques, vol.135, p. 3-20.

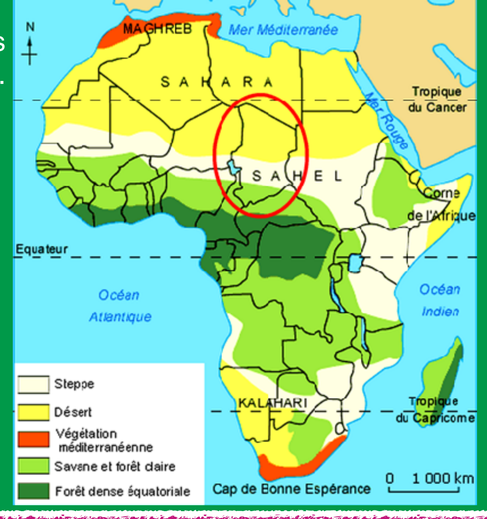
Keller R. (1993). Influence de quelques facteurs de la production sur la constitution du bois des arbres forestiers, Acta Botanica Gallica, vol. 140, no 4, p. 371-379.

Keller T., Edouard J.L., Guibal F., Guio J., Tessier L., Vila B. (2000). Impact d'un scénario climatique de réchauffement global sur la croissance des arbres, compte rendus de l'Académie des Sciences-Séries III-sciences de la vie, vol 323, no 10, p.913-924.

Lebourgeois F. (2005). Approche dendroécologique de la sensibilité du hêtre (Fagus sylvatica L.) au climat en France et en Europe, Revue Forestière Française, vol. 1, P.33-50.

Manise T., Vincke C. (2014). Impacts du climat et des déficits hydriques stationnels sur la croissance radiale du hêtre, du chêne, de l'épicéa et du douglas en Wallonie, Forêt Wallonne, n°129, p.48-57.

Influence du changement climatique sur les propriétés physiques et mécaniques du bois d'essences des zones semi-arides



Le Tchad dans les paysages naturels de l'Afrique.

DOUGABKA Dao[1, 2], GERARD Jean[1], GUIBAL Daniel[1], TIKRI Bianzeubé[2]

[1]UR BioWooEB, CIRAD
[2]Université Polytechnique de Mongo, Tchad

Contact : dougabkadao@yahoo.fr

Contexte de l'étude

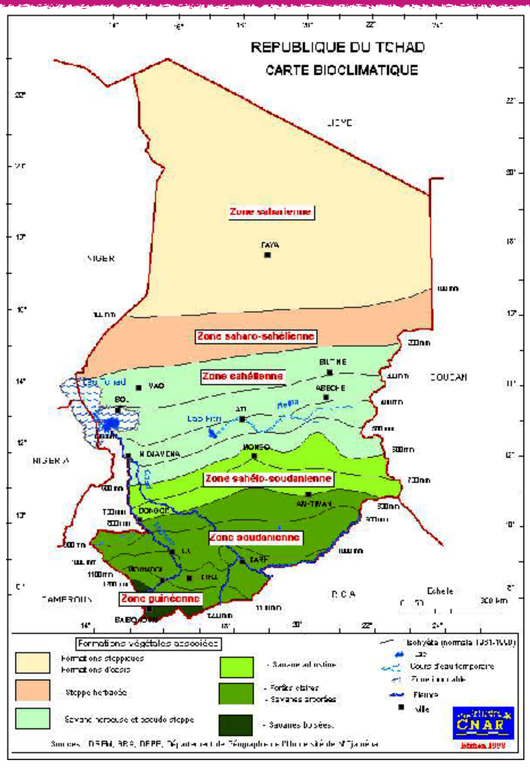
Le bois est un matériau dont les propriétés sont liées à ses conditions de croissance.

Avec le changement climatique caractérisé par une augmentation de la température et une irrégularité de la pluviométrie, les propriétés technologiques du bois sont modifiées.

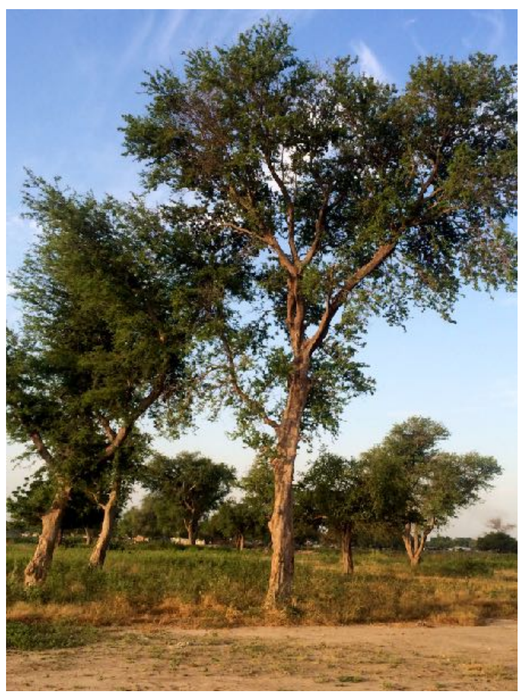
Ce phénomène est particulièrement sensible dans un pays comme le Tchad dont les conditions climatiques sont déjà extrêmes.

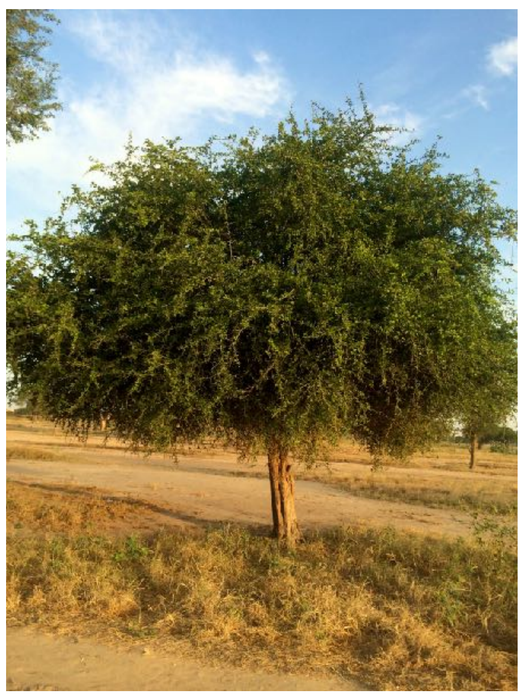
Ces modifications de propriétés impactent la qualité des ouvrages et des objets fabriqués.

Principale question de recherche : comment et avec quelle intensité le changement climatique modifie-t-il certaines propriétés du bois ?



Carte bioclimatique du Tchad.





Faidherbia albida et *Balanites aegyptiaca* (forêt dégradée de Walia, N'Djamena).

Objectifs

- Comprendre la réaction des essences de bois tchadiennes face au changement climatique et quantifier l'évolution de leurs propriétés.
- Contribuer à valoriser les essences locales les moins sensibles à ce changement grâce à une meilleure connaissance de leur comportement technologique.

Premières essences choisies pour l'étude

- *Faidherbia albida* et *Balanites aegyptiaca*

Critère de choix d'essences de bois

- Répartition sur la majorité des zones climatiques tchadiennes.
- Disponibilité dans d'autres pays sahéliens.
- Usage au niveau local comme bois d'œuvre, bois énergie, bois de service…

Première étude : propriétés physiques du bois de *Faidherbia albida*

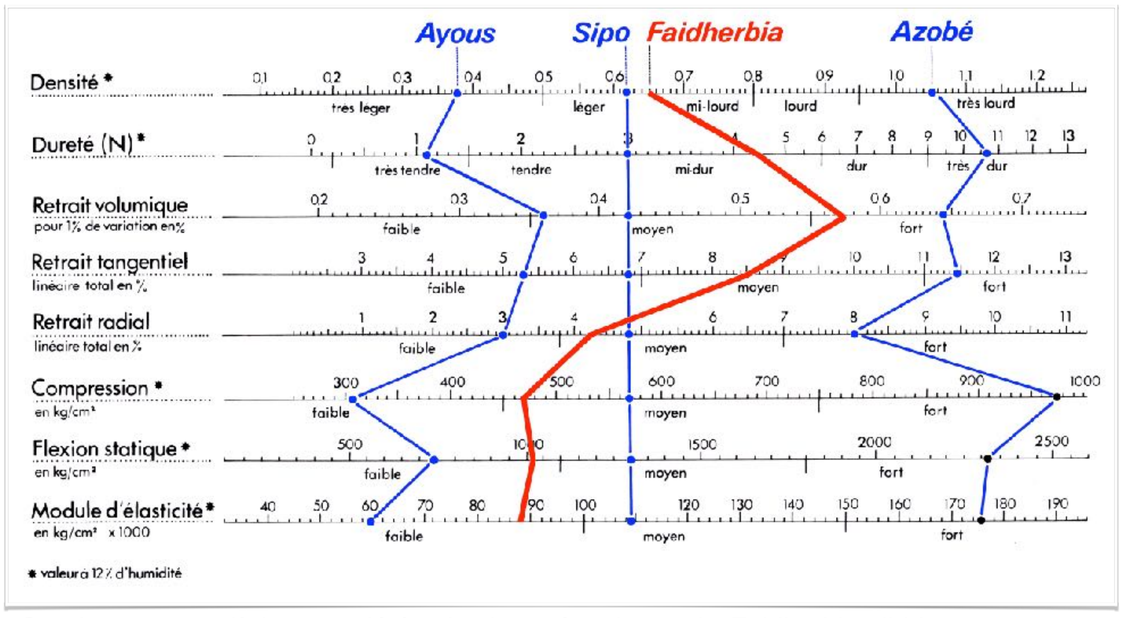
Echantillonnage

- Sélection des arbres dans deux zones climatiques différentes du Tchad : zone sahélienne (région de N'Djamena) et zone soudanienne (région de Léré).
- Prélèvement de 3 arbres par espèce et par zone climatique.
- Echantillonnage conditionné par les restrictions relatives aux coupes de bois au Tchad.

Protocole expérimental

- Sélection d'une bille de pied par arbre.
- Débit de plateaux diamétraux dans lesquels seront prélevées les éprouvettes d'essai.

Résultats déjà disponibles sur *Faidherbia albida*



Graphe comparatif des propriétés physico-mécaniques de *Faidherbia albida* (*Faidherbia albida – monographie*, CTFT, 1988).

Faidherbia albida : objets sculptés.
Balanites aegyptiaca : objets traditionnels et ustensiles domestiques.

Méthode

Etude des propriétés technologiques de référence

Etude dendrochronologique de chacune des essences

Etude des propriétés technologiques en fonction de la croissance

Caractéristiques physiques de *Faidherbia albida* (Giffard, 1971).

Propriétés physiques	Echantillon 1	Echantillon 2
Densité	0,58	0,71
Retrait radial (%)	3,7	4,6
Retrait tangentiel (%)	8,4	8,6
Taux d'humidité (%)	10,3	9,8
PSF (%)	22	24

Références

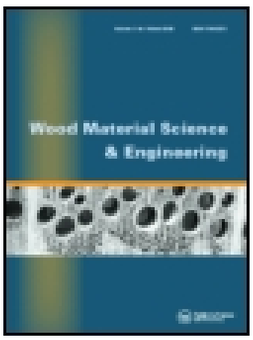
Aussenac G. (1978). La sécheresse de 1976 : influence des déficits hydriques sur la croissance des arbres forestiers, Revue Forestière Française, vol.2, p.103-113.

Breda N., Granier A., Aussenac G. (2000). Evolutions possibles des contraintes climatiques et conséquences pour la croissance des arbres, Revue Forestière Française, Vol. LII, p.73-90.

Giffard P.L. (1971). Recherches complémentaires sur *Acacia albida* (Del), Bois et Forêt des Tropiques, vol.135, p. 3-20.

Manise T., Vincke C. (2014). Impacts du climat et des déficits hydriques stationnels sur la croissance radiale du hêtre, du chêne, de l'épicéa et du douglas en Wallonie, Forêt Wallonne, n°129, p.48-57.

Conception: Cirad, Marine Coupon, novembre 2018 – © photos Cirad



Wood Material Science & Engineering

ISSN: (Print) (Online) Journal homepage: https://www.tandfonline.com/loi/swoo20

Influence of Sahelian and Sudanian provenances on the physical and mechanical properties of *Faidherbia albida* wood from Chad

Dao Dougabka, Jean Gerard, Tikri Bianzeube, Remy Marchal, Daniel Guibal & Alban Guyot

To cite this article: Dao Dougabka, Jean Gerard, Tikri Bianzeube, Remy Marchal, Daniel Guibal & Alban Guyot (2021): Influence of Sahelian and Sudanian provenances on the physical and mechanical properties of *Faidherbia albida* wood from Chad, Wood Material Science & Engineering, DOI: 10.1080/17480272.2021.1929467

To link to this article: https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1929467

Published online: 18 May 2021.

Submit your article to this journal

Article views: 39

View related articles

View Crossmark data

Full Terms & Conditions of access and use can be found at
https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=swoo20

WOOD MATERIAL SCIENCE & ENGINEERING
https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1929467

Taylor & Francis
Taylor & Francis Group

ORIGINAL ARTICLE

Check for updates

Influence of Sahelian and Sudanian provenances on the physical and mechanical properties of *Faidherbia albida* wood from Chad

Dao Dougabka[a,b,c], Jean Gerard[a,b], Tikri Bianzeube[c], Remy Marchal[d], Daniel Guibal[a,b] and Alban Guyot[a,b]

[a]UPR BioWooEB, CIRAD, Montpellier, France; [b]BioWooEB, Univ Montpellier, CIRAD, Montpellier, France; [c]Université Polytechnique de Mongo, N'Djamena, Tchad; [d]Arts et Metiers Institute of Technology, LABOMAP, HESAM Université, Cluny, France

ABSTRACT

Faidherbia albida is a typical emblematic species of African dryland areas. In Chad, it is used for many purposes, but very little is known about the technological properties of its wood, which sometimes leads to inappropriate uses. This work consisted to study the physical and mechanical properties of this wood, collected in the Sahelian and Sudanian chadian zone. As well as the impact study of the sampling areas of these properties. The result obtained shows that, the density, infradensity; modulus of elasticity, compression strength were significantly higher in the Sahelian zone than in the Sudanian zone, i.e. 508 and 409 kg·m^{-3}; 5555 and 23.7 MPa, compared to 444 and 359 kg·m^{-3}; 4150 and 19.6 MPa. The total tangential shrinkage, total volumetric shrinkage, fibre saturation point; static bending strength were significantly lower in wood from the Sahelian zone compared to the Sudanian zone, i.e. 4.6%, 7.7%, 23.7%; 42.5 MPa, compared to 6.6%, 9.5%, 28.9%; 52.6 MPa. The total radial shrinkage values obtained were not significantly different between the two provenances (mean: 3.1%).

ARTICLE HISTORY
Received 26 March 2021
Revised 3 May 2021
Accepted 5 May 2021

KEYWORDS
Faidherbia albida; wood; physical properties; mechanical properties; Chad

1. Introduction

Faidherbia albida (Delile) A. Chev. belongs to the Fabaceae family (Mimosaceae subfamily). This species is found throughout dryland areas of Africa and the Middle East, as well as in Asia where it has been introduced (Wood 1989).

It is an emblematic species in the Sahelian region, where it is used for many purposes. *F. albida* trees can grow to 15–20 m in height with a trunk diameter of about 1 m. The leaves and fruit are used as livestock feed (Kini 2018). Moreover, its soft, light yellow wood is used for making art objects (sculpture), kitchen utensils (pestles, mortars, gourds, etc.), building huts and granaries, and as fuelwood. Its bark and roots are used in traditional medicine. This species has a particularly remarkable ability to improve the soil quality, while also being unique for its reverse phenology feature. Studies of, Sileshi (2016) and Dilla *et al*. (2019) have shown that *F. albida* improves soil quality by fixing nitrogen from the air, as do many Fabaceae species, but also by bringing mineral elements from the deep soil horizons and to the surface. These trees bear leaves, flowers, and fruit in the dry season and then lose them completely in the rainy season, thereby facilitating intercropping, so it is an ideal agroforestry tree (Depommier 1998).

Moreover, the studies of Mignon and Do (1999) and Roupsard *et al*. (1999) showed that *F. albida* is a phreatophyte species, i.e. it absorbs water from the water table to meet its metabolic needs. This characteristic was highlighted in a study of its root system and drought tolerance. Wood (1989) showed that tap roots of *F. albida* trees growing on sand dunes can reach a depth of over 5 m within 1 year these roots stop growing when they have reached a sufficient depth to fulfil the tree's water needs.

In Chad, the vegetation consists mainly of small and thorny trees. Some species such as *F. albida* are used specially to meet wood needs in rural areas. These species are not marketed and their wood quality has only been studied in a piecemeal manner. However, it is essential to gain insight into their technological characteristics and their variations in order to better understand their technological behaviour and enhance their use.

In local markets, end users show a preference for products and objects made from wood from the Sahelian zone where growing conditions are unfavourable compared to the more favourable conditions in the Sudanian zone (rainfall, temperature). Items made with wood from the Sudanian zone are generally less resistant with a greater tendency to split and deform than wooden items from the Sahelian zone.

In their study of *F. albida* from eastern and southern Africa (Taveta in Kenya, Lupaso and Wangingombe in Tanzania, Kuiseb in Namibia, Manapools in Zimbabwe), Koech *et al*. (2016) showed that provenances from the driest areas with the least rainfall had better growth than those located in areas under high rainfall conditions.

One of the aims of this study was to highlight differences in wood quality when comparing the reference technological properties of the two studied provenances. By gaining greater insight into the properties of *F. albida* wood, farmers would be able to better tailor its uses, in turn generating additional income, while encouraging them to plant this species in agroforestry systems.

The results obtained will also enable us to assess the impact of the species' phreatophyte feature on these properties.

CONTACT Dao Dougabka dougabkadao@yahoo.fr UPR BioWooEB, CIRAD, 34398 Montpellier, France; Université Polytechnique de Mongo, BP: 4377 N'Djamena, Tchad

© 2021 Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group

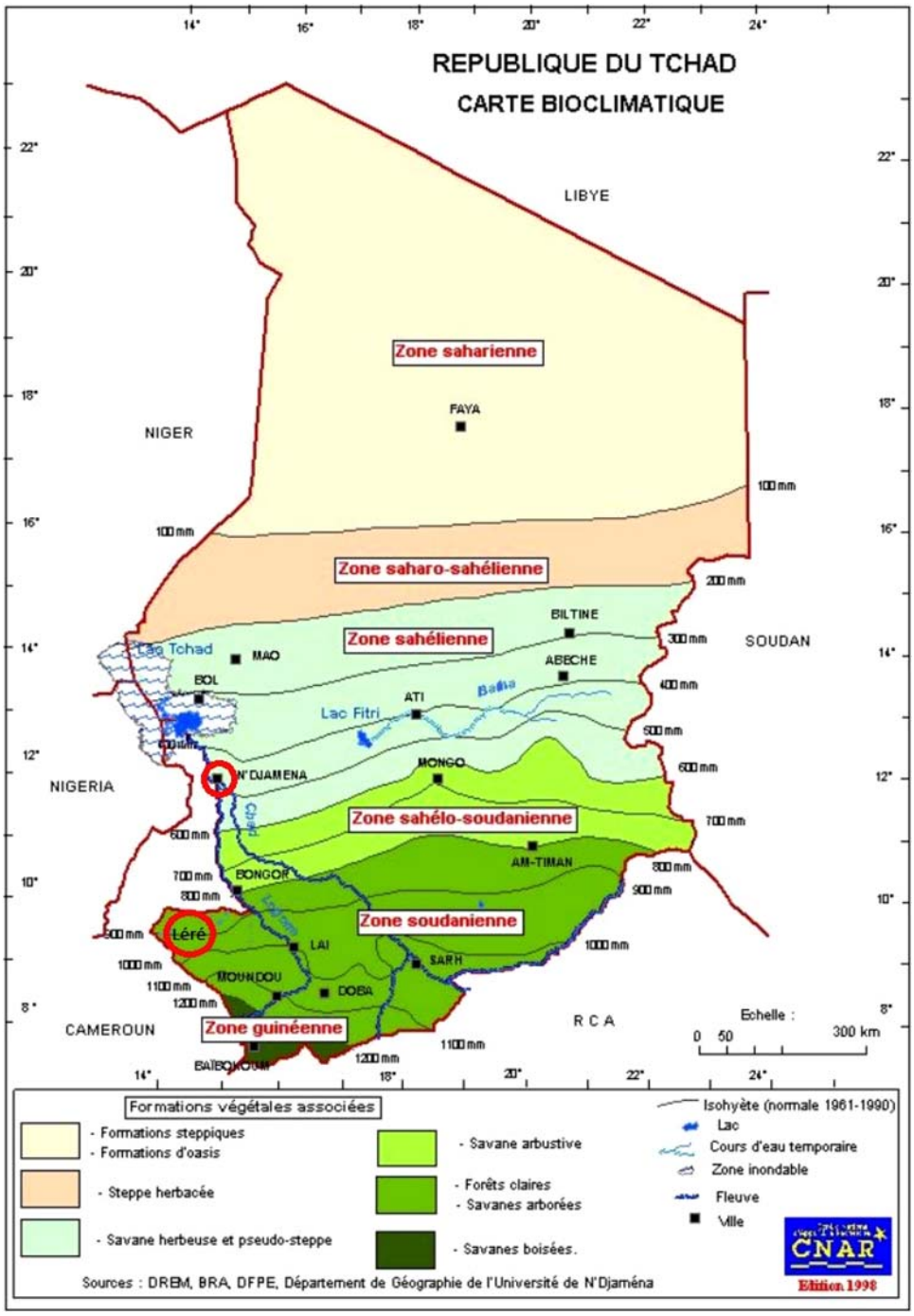


Figure 1. Bioclimatic map of Chad.

The following properties were selected for this study:

(1) Indicators of the physical stability of *F. albida* wood: density, infradensity, total radial drying shrinkage, total tangential drying shrinkage, total drying shrinkage and fibre saturation point. These characteristics are major indicators of the wood quality and its stability after usage (Mazet and Nepveu 1991, Kržišnik *et al*. 2019), while being closely related to its structure and providing information on its technological behaviour in relation to the growth conditions.

(2) Indicators of mechanical behaviour: longitudinal modulus of elasticity, static bending strength and longitudinal compression strength.

2. Materials and method

2.1. Study areas, sampling method and test specimen processing technique

The woods studied were sampled in N'Djamena and Léré regions in Chad, located in two different climatic zones (Figure 1):

Table 1. GPS coordinates and dendrometric data.

Provenance	Tree number	Longitude (decimal degrees)	Latitude (decimal degrees)	Trunk height (m)	Diameter (cm)
Sahelian zone	1	15.10173	12.05051	3.62	27.98
	2	15.10222	12.05081	2.87	29.37
	3	15.10227	12.05078	2.96	28.08
	4	12.05056	15.10223	3.10	29.96
Sudanian zone	1	14.08860	9.64318	3.46	27.6
	2	14.08470	9.64110	3.38	29.10
	3	14.08915	9.64488	2.78	28.55

- The Sahelian zone (N'Djamena) characterised by 556 ± 121 mm average annual rainfall with a 15–44°C temperature range (1984–2018).
- The Sudanian zone (Léré) with 860 ± 114 mm average annual rainfall and a 25–35°C temperature range (1980–2015) (Climate data source: Agence National de la Météorologie (ANAM-Chad)).

The plant material was in located reforestation sites and was sampled despite the prevailing administrative and logistical stress and constraints. This involved seven trees with a trunk diameter of 27–30 cm (Table 1). Four were sampled in the Sahelian zone and three in the Sudanian zone. The average tree age was estimated at between 20 and 25 years.

Trees selected was based on their diameter, growth habit and health status, i.e. conventional selection criteria for timber applications (Charron *et al*. 2003).

The test specimens were obtained using the following process:

- Each tree was felled 50 cm above the ground. This felling height was set to technically facilitate the operation (manual felling).
- A first log of about 1 m long above the cut was selected from each trunk.
- A diametric 60 cm long × 6 cm thick block was cut from each log.
- The seven sampled blocks were initially dried for three months under cover in natural ambient conditions at the felling site in Chad, and then they were stabilised at CIRAD-Montpellier (France) in a climatic chamber at 20°C and 65% relative humidity (climatic conditions allowing the wood to be stabilised at a theoretical 12% moisture content).
- After three weeks of stabilisation, positions where the test specimens were to be sampled were marked on the block cross-sections. These positions were determined to ensure that the specimen sections would be properly radially and tangentially oriented.
- The specimens (nominal cross-section plus an extra dimension) were cut from the blocks and then further stabilised under a controlled atmosphere at 20°C and 65% relative humidity to a constant weight.
- After a final stabilisation step, these specimens were machined into 20×20 mm^2 (radial × tangential dimension) bars with a length equalling that of the initial block. Three groups of 20×20 mm^2 specimens, but of different lengths (L), were cut from these bars, depending on the type of test to be carried out:
  $L = 360$ mm for bending tests;
  $L = 60$ mm for compression tests;
  $L = 10$ mm for assessment of physical properties.

In each of the 7 blocks corresponding to the 7 sampled trees, 6–12 bars were machined, i.e. 29 bars for the Sahelian zone and 27 bars for the Sudanian zone. The number of bars machined in each block depends on the trees diameter. In each bar, 3 specimens were cut, i.e. 87 specimen for the Sahelian zone and 81 specimens for the Sudanian zone as mentioned in Table 2.

All the tests were carried out at CIRAD-Montpellier.

2.2. Test methods

2.2.1. Physical properties

The reference physical properties studied were 12% MC density, infradensity, total radial drying shrinkage, total tangential drying shrinkage, total volume shrinkage and fibre saturation point.

Two other properties were also assessed: total volume shrinkage coefficient and shrinkage anisotropy.

The 12% density was determined simultaneously with the longitudinal modulus of elasticity. The corresponding measuring method is described in section Mechanical properties.

The other five physical properties were determined in a single procedure on the same specimens.

These specimens were first soaked to saturation in distilled water for three days and then they underwent three vacuum-pressure cycles in an autoclave to expel any air pockets trapped in the wood.

After saturation, the specimens were weighed and their radial and tangential dimensions measured.

Their saturated volume was determined by the double weighing method according to the Archimedes' thrust

Table 2. Physical and mechanical properties of *F. albida* from chadian Sahelian and Sudanian zones.

Provenances [number of specimens]	Statistic	Rr (%)	Rt (%)	Rv (%)	Anis	PSF (%)	Id (kg/m^3)	Mv (kg/m^3)	C_{12} (MPa)	F_{12} (MPa)	E_{12} (MPa)
Sudanian zone [87]	Average	3.1	6.6	9.5	2.2	28.9	359	444	19.6	52.6	4150
	Sd	0.63	0.91	1.43	0.34	2.7	46.5	42.6	3.3	11	884
	CV	20.6	13.8	15	15.4	9.5	12.9	9.6	16.7	21	21.3
Sahelian zone [81]	Average	3.1	4.6	7.7	1.5	23.7	409	508	23.7	42.5	5555
	Sd	0.44	0.62	1.16	0.19	1.3	37.2	38	3.1	11	1449
	CV	14.4	13.5	15	12.2	5.4	9.1	7.5	13.2	26	13.2

Note: Rr: total radial shrinkage; Rt: total tangential shrinkage; Rv: total volumetric shrinkage; Anis: shrinkage anisotropy; PSF: fibre saturation point; Id: infradensity; Mv: 12% density; C_{12}: longitudinal compression strength; F_{12}: static bending strength; E_{12}: longitudinal modulus of elasticity; CV: coefficient of variation; Sd: Standard deviation.

principle: this volume was determined by the weight of the volume of water displaced when a test tube was immersed in a beaker filled with water weighed before and after immersion.

After this first stage of measurements in the saturated state, and in order to determine the fibre saturation point (FSP), the specimens were stabilised in a climatic chamber successively at 85% ambient relative humidity and 30°C (equilibrium moisture content [EMC] of the wood close to 18%), 65% ambient relative humidity and 20°C (EMC close to 12%), and then 30% ambient relative humidity and 20°C (EMC close to 6%).

They were finally oven dried to an anhydrous state at 103° C. According to the French NF EN 13183-1 standard of June 2002, a wood sample is considered anhydrous when the variation in its mass between two successive weighings within a 2 h interval does not exceed 0.1%.

The specimen densities and radial and tangential dimensions were measured in each stabilised state.

2.2.1.1. Infradensity. The infradensity of a sample is the ratio between its anhydrous mass (M_a) and its saturated volume (V_s), expressed in kg/m^3. This reference characteristic has the advantage of being easy to determine when a climatic room is not available to stabilise samples at controlled temperature and humidity conditions.

$$d = \frac{M_a}{V_s} \quad (1)$$

2.2.1.2. Total linear cross-sectional shrinkage. Linear cross-sectional drying shrinkage is an indicator of dimensional variations in wood when its moisture content falls below the fibre saturation point. This dimensional variation is different in the tangential and radial directions of the wood. It is expressed as a percentage and is calculated according to the following formula (NF B 51-006 standard, September 1985):

$$R_{T,R} = \frac{e_s - e_0}{e_s} \quad (2)$$

where e_s and e_o are respectively the dimensions of the samples in the saturated and anhydrous state according to the direction considered.

$R_T > R_R$ always applies regardless of the type of wood considered.

2.2.1.3. Shrinkage anisotropy. The wood shrinkage anisotropy is determined by the tangential to radial shrinkage ratio.

This parameter is a good indicator of the extent of deformation of a piece of wood subjected to humidity variations, and of the stability of wood during its drying and usage (Gérard *et al*. 2016).

When the R_T/R_R ratio is greater than 2, it is considered that the studied wood is likely unstable and prone to splitting and deformation.

2.2.1.4. Total volumetric shrinkage. The total drying volumetric shrinkage (R_B) corresponds to the volume variation of a wood specimen between the saturated and anhydrous state.

Since the longitudinal shrinkage is usually very small compared to transverse linear shrinkage, the sum of the radial and tangential shrinkage ($R_R + R_T$) provides a good approximation of the volume shrinkage.

$$R_B = \frac{V_s - V_a}{V_s} \cong R_R + R_T \quad (3)$$

where V_s is the saturated volume and V_a is the anhydrous volume.

2.2.1.5. Fibre saturation point. The fibre saturation point (FSP) is the moisture content of wood saturated with bound water, below which the wood dimensions vary according to the ambient humidity.

It usually ranges from 20% to 40% depending on the species, but is generally around 30% (Gérard *et al*. 2016).

The FSP is obtained by stabilising the wood samples at different moisture contents between the saturated and anhydrous state, at ambient temperature and relative humidity conditions corresponding to theoretical wood moisture contents of successively around 18%, 12% and 6%. The specimen weights and dimensions are measured at each stage. The exact moisture content of the specimens is determined at the end of the experiment after they have been weighed in the anhydrous state.

The fibre saturation point (FSP) is determined from the intercept of the regression lines between the cross-sectional area variations of the specimens and their moisture content (Figure 2): [Moisture content] = *f* [Area variations]. It corresponds to the moisture content above which the dimensional variations are zero (Kokutse *et al*. 2010).

The wood FSP values below 25% are considered low, medium for values between 25% and 35%, and high for values above 35% (Gérard *et al*. 2016).

2.2.2. Mechanical properties

The reference mechanical properties studied were the longitudinal modulus of elasticity, static bending tensile strength and longitudinal compressive strength.

2.2.2.1. Measurement of the longitudinal modulus of elasticity and density by the vibration method. A BING© (Beam Identification by Non-destructive Grading) device was used for this measurement method. This non-destructive method

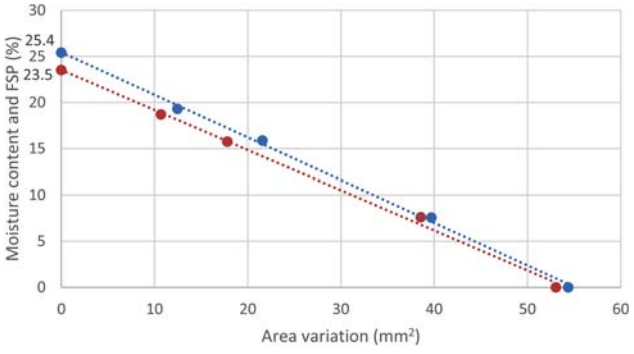


Figure 2. Example FSP determination of two *F. albida* specimens.

was developed at CIRAD. It is based on the study of vibrations of a wood specimen or any other material. The device may be used to determine the elastic characteristics (longitudinal modulus of elasticity, transverse shear modulus) of any rigid material. A thin specimen with regular geometrical features must be used for the measurement operation, while controlling the support conditions. The specimen is subjected to longitudinal or transverse vibrations and the studied characteristics determination is based on the recording and its analysis.

The measurement principle consists of analysing the resonance Eigen frequencies obtained after an impulse excitation on one of the ends of a specimen resting on two elastic support holders of low rigidity.

The measurements were carried out on $360 \times 20 \times 20$ mm^3 specimens stabilised at 12% moisture content.

2.2.2.2. Longitudinal compression strength. The longitudinal compression strength was determined according to the measurement method defined by the NF ISO 13061-17 (June 2018) standard. Measurements were obtained on standardised longitudinally oriented specimens ($60 \times 20 \times 20$ mm^3), and stabilised in climate-controlled chamber at 12% humidity. The tests were carried out on an ADAMEL universal testing machine equipped with a 100 KN maximum load cell. This machine consists of a fixed swivel plate upon which the sample is placed and a load cell to apply compression force to the sample. The test speed is 0.01 mm/s. A computer is used for data acquisition (load, displacement).

2.2.2.3. Static bending strength. The static bending strength was determined according to the French standard NFB51-008 (26 July 2017). The test was carried out on $360 \times 20 \times 20$ mm specimens that had previously been used for the longitudinal modulus of elasticity tests. The machine used was the same as that used for the compression tests after adapting the frame. The testing time was 1.5 ± 0.5 min.

The maximum stress was determined according to the following equation:

$$\sigma = \frac{3P(l-a)}{2bh^2} \quad (4)$$

where σ is the bending tensile strength (MPa); P is the total tensile strength (N); l is the distance between frame rollers (320 mm); a is the distance between upper rollers (160 mm); b is the specimen width (mm); h is the specimen height (mm)

At the end of the test, the specimen moisture contents were determined according to the procedure defined in the NF EN 13183-1 standard (June 2002).

3. Results and discussion

3.1. Descriptive statistics of the measured properties

The data processing and analyses were performed using the XLSTAT-Student 2019.4.1 software package.

Table 2 presents the descriptive statistics regarding the *F. albida* physical and mechanical properties obtained for the two Chadian climatic zones.

3.2. Observed trends and comments on the measured wood properties

3.2.1. Physical properties

F. albida woods from the Sudanian and Sahelian zones had the same mean radial shrinkage value (3.1%), but the first zone results showed greater dispersion than those of the second (coefficient of variation of 20.6% and 14.4%, respectively). Yet the radial shrinkage coefficient was higher for the Sahelian zone compared to the Sudanian zone, i.e. 0.13%/% vs. 0.11%/%, respectively.

The mean tangential shrinkage was 6.6% in wood from the Sudanian zone vs. 4.6% for the Sahelian zone, but there was relatively little dispersion in the results (coefficient of variation of 13.8% and 13.5%, respectively).

The volumetric shrinkage values were higher for the Sudanian zone than for the Sahelian zone, i.e. $9.5\% \pm 1.43$ vs. $7.7\% \pm 1.16$, respectively.

The shrinkage anisotropy value was higher in wood from the Sudanian zone compared to the Sahelian zone, i.e. 2.2 vs. 1.5, respectively, due to the higher tangential shrinkage in wood from the second zone, while there was little dispersion in the results for the two zones (coefficient of variation of 15.4% and 12.2%, respectively).

The fibre saturation point was higher in specimens from the Sudanian zone than in those from the Sahelian zone, i.e. 28.9% vs. 23.7%, respectively, with a higher dispersion in the results for the first zone (9.5% vs. 5.4%).

Infradensity and density at 12% were lower in wood from the Sudanian zone than in specimens from the Sahelian zone (359 and 444 kg·m^{-3} vs. 409 and 508 kg·m^{-3}, respectively), but with higher dispersion of the results for the first zone (12.9% and 9.6% vs. 9.1% and 7.5%).

3.2.2. Mechanical properties

The longitudinal modulus of elasticity and the compression strength were lower in specimens from the Sudanian zone compared to the Sahelian zone, i.e. 4150 ± 884 and 19.6 ± 3.3 MPa vs. 5555 ± 1449 and 23.7 ± 3.1 MPa, respectively.

On the other hand, the bending tensile strength was higher for the Sudanian zone than for the Sahelian zone, i.e. 52.6 vs. 42.5 MPa, respectively, with high dispersion in the results (coefficient of variation of 21% and 26%, respectively).

For the two provenances, the values of longitudinal modulus of elasticity are low in regard to density. Explanation could be given through further anatomical investigation of wood.

3.3. Influence of provenances on the wood properties

In order to validate the actual impacts of provenances on the studied properties, a graphical statistical analysis was conducted that involved comparing the data distributions presented in the form of notched boxplots (Figure 3), graphical representations generated from Mood's tests (non-

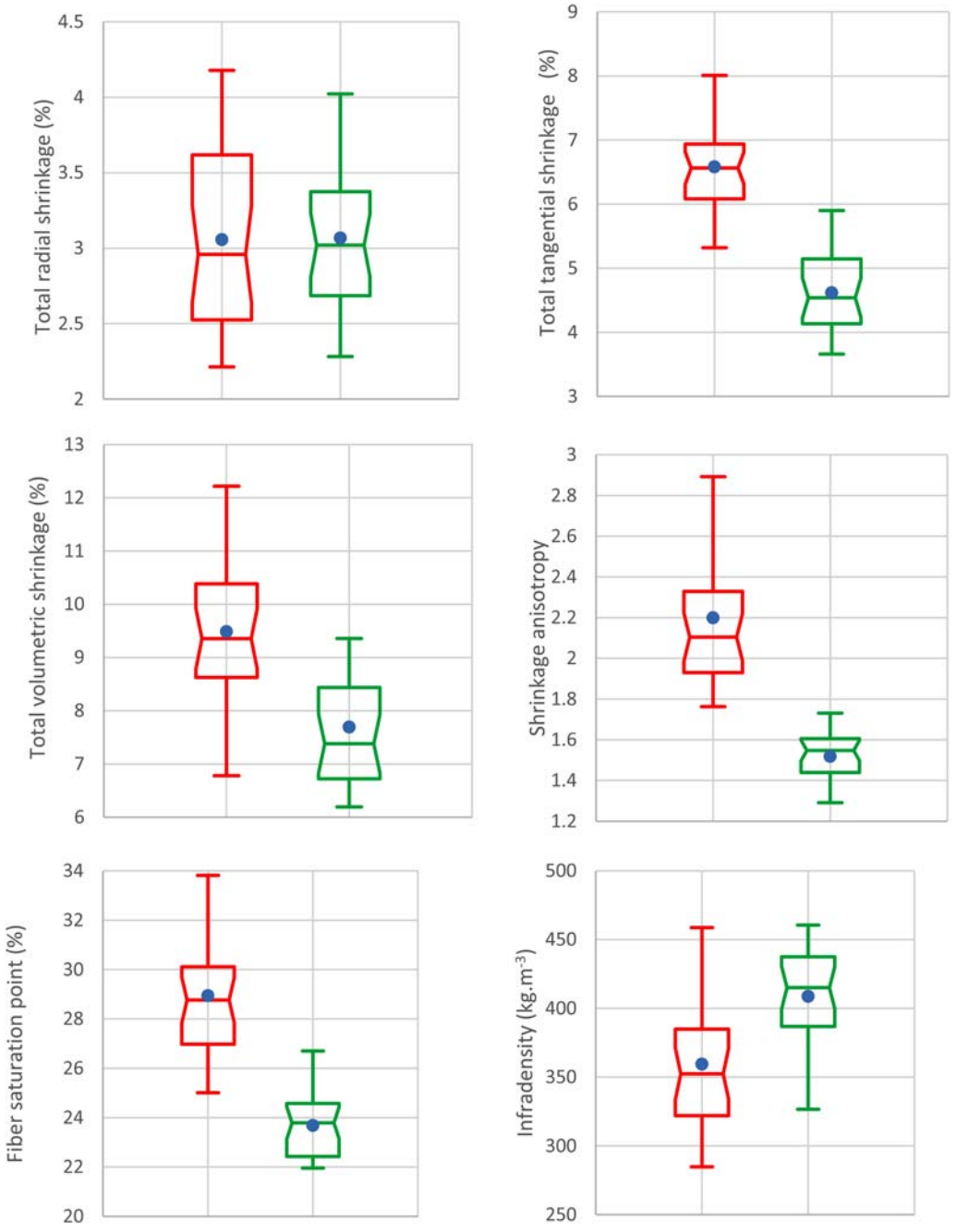


Figure 3. Distribution of *F. albida* wood properties according to provenance.

parametric tests tailored for small datasets). These representations helped highlight differences or the absence of significant differences between the two provenances for each of the properties studied.

The interpretation principle for these graphs was based on a comparison of medians, as represented by central horizontal bars. The notched portion represents a confidence interval around the medians. A discrepancy between the notched sections on the graphs indicates a significant difference in position between the distribution medians. The blue dot corresponds to the mean of the represented property.

An analysis of these paired graphs for each of the studied properties showed that the wood provenance had an impact on these properties, except for the radial shrinkage for which the differences between the two provenances were not significant at the 5% threshold.

The density and infradensity were very significantly higher in wood from the Sahelian zone compared to the Sudanian zone, i.e. 508 and 409 $kg{\cdot}m^{-3}$ vs. 444 and 359 $kg{\cdot}m^{-3}$, respectively. This difference in density between the two zones could be explained by the difference in growing conditions related to rainfall levels.

Tangential shrinkage was significantly much lower in wood from the Sahelian zone. However, radial shrinkage was not significantly different between the two regions. The latter result was in line with that obtained by Traoré (2009) on vène wood from Mali (*Pterocarpus erinaceus*). The author had not observed a significant difference in linear

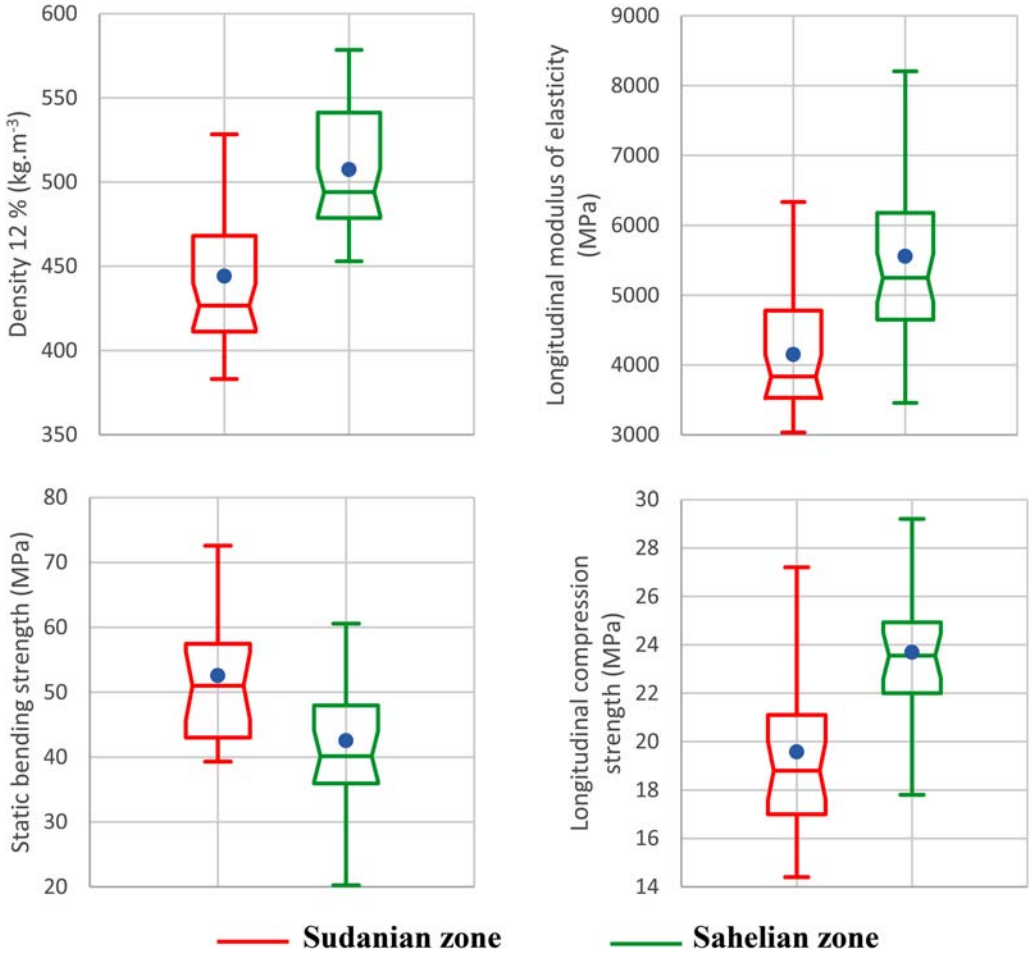


Figure 3 *Continued*

shrinkage between the two studied provenances, which were characterised by different growing conditions (Guinean zone and Sudanian zone).

This result had been attributed to the high extractive content in vène wood, which could limit the direct effect of anatomical changes related to growing conditions on drying shrinkage.

F. albida also had a very high extractive content, although it was lower than that of vène. The CIRAD wood database (Gérard *et al*. 2019) also gives a total extractive content of 8.6% for a Senegalese provenance, and 17.2% for vène from Senegal, while the results reported by Traoré (2009) indicated total extractive contents of between 15.5% and 19.5%.

The volumetric shrinkage and fibre saturation point were significant between the two provenances (9.5% and 28.9% in specimens from the Sudanian zone, and 7.7% and 23.7% in those from the Sahelian zone, respectively).

Similarly, the shrinkage anisotropy was significantly higher for the Sudanian zone Mazet and Nepveu (1991), Masseran and Mariaux (1985), and Charron *et al*. (2003) have shown that this anisotropy depends more on radial than tangential shrinkage. However, the tangential shrinkage in our case was significantly higher in the Sudanian zone, whereas the radial shrinkage values were identical for both zones, thereby explaining this difference in anisotropy.

The findings obtained for three mechanical characteristics studied were significantly different for the two provenances. The modulus of elasticity and the longitudinal compression strength were higher in wood from the Sahelian zone compared to the Sudanian zone (5555 vs. 4150 MPa and 23.7 vs. 19.6 MPa, respectively). This difference should be considered relative to the higher density of wood (12% density and infradensity) from the Sahelian zone.

Contrary to the two previous properties, the modulus bending tensile strength was higher for the Sudanian zone (52.6 MPa) than for the Sahelian zone (42.5 MPa).

Similar studies carried out on different tropical species adapted to contrasting climatic conditions have highlighted the influence of the provenance on the main wood properties, but with varying trends.

Regarding *P. erinaceus*, Segla *et al*. (2015) and Traoré (2009) have documented a significant variation in density, infradensity and shrinkage anisotropy according to the provenance of woods from the Sudanian, Guinean, Malian and Togolese zones. These properties were found to increase with the extent of climatic dryness in the region of provenance, associated with harsher growing conditions. On the other hand, no significant difference between provenances was observed with regard to total radial shrinkage and total tangential shrinkage. On this same wood, Segla *et al*. (2020) showed that individual tree samples from the Sahelian zone

were denser (780 ± 63 kg·m^{-3}), than those in the Guinean zone (basic density = 684 ± 53 kg·m^{-3}) and the Sudanian zone (basic density = 725 ± 70 kg·m^{-3}).

Out of four *Pinus tecunumanii* provenances from Guatemala sampled in four different departments, Eguiluz-Piedra and Zobel (2007) noted an increase in density over a west-to-east gradient in relation to an increase in climatic dryness.

In a sample of Indian teak trees aged between 21 and 65 years, Bhat and Priya (2004) showed a significant influence of provenance on the physical and mechanical properties studied (density, modulus of elasticity, bending tensile strength and compressive strength). However, it is under an inverse trend compared to that of the previously mentioned results: wood from the Kanara provenance, a region where growing conditions are harsher (drier climate), had lower wood property results compared to wood from the Malabar provenance.

Depending on the species considered, the impact of growing conditions on the physical properties of tropical species adapted to different climatic conditions seem to vary markedly, sometimes with completely opposite trends.

4. Conclusion

This study was conducted on a limited sample size due to administrative, regulatory and logistical constraints at the sampling sites in Chad. However, it did reveal clear trends in the technological properties of *F. albida* wood and regarding the influence of the provenance on these properties.

Although *F. albida* is a phreatophytic species, the study revealed differences between its physical and mechanical wood properties according to the two study regions where the growing conditions differ, mainly due to differences in rainfall.

Wood sampled from the region with harsh growing conditions (Sahelian zone) had a higher density than that from the region with more favourable growing conditions (Sudanian zone). The same trend was noted for two of the three mechanical characteristics studied, i.e. longitudinal modulus of elasticity and compressive strength.

Woods from the Sahelian zone were also found to have better indicators of physical stability: total tangential shrinkage, total volume shrinkage, shrinkage anisotropy and fibre saturation point.

The better results obtained for the physical stability indicators and mechanical properties (except bending tensile strength) for wood from the Sahelian zone was in line with what was observed in local markets. Indeed, for products and objects made from *F. albida* wood, end users were found to prefer wooden items from the Sahelian zone, which were considered to be stronger and more stable than those from the Sudanian zone.

No significant differences between the two zones were noted for total radial shrinkage. This finding could be related to the high extractive content of *F. albida* wood.

This study of *F. albida* an emblematic multifunctional species throughout the Sudano-Sahelian zone should now be extended to encompass other provenances, particularly from Senegal, where it is also a major wood resource.

The study of the influence of climatic conditions on the *F. albida* wood characteristics could be extended to other major species growing in this area, particularly *Balanites aegyptacia,* another emblematic species of the region which has a similar distribution to that of *F. albida* in semiarid to arid zones.

Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the author(s).

References

Bhat, K. M. and Priya, P. B. (2004) Influence of provenance variation on wood properties of teak from the Western Ghat Region in India. *IAWA Journal*, 25, 273–282. Available at: https://doi.org/10.1163/22941932-90000365

Charron, S., Jourez, B., Marchal, M. and Hébert, J. (2003) Étude comparative des caractéristiques physiques et mécaniques du bois des mélèzes d'Europe (*Larix decidua* Mill.), du Japon (*Larix kaempferi* (Lambert) Carr.) et de leur hybride (Larix x eurolepis Henry). *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, 12. ISSN:1780-4507. Available at: https://popups.uliege.be/1780-4507/index.php/base/issue/index.php?id=14436

Depommier, D. (1998) Etude phénologique de *Faidherbia albida*: effet de l'émondage, du site et de la dimension de l'arbre sur les phénophases de l'espèce au Burkina Faso. In C. Campa, C. Grignon, M. Gueye, and S. Hamon (eds.), *L'acacia au Sénégal* (Paris: ORSTOM), pp. 159–179. (Colloques et Séminaires). L'Acacia au Sénégal: Réunion Thématique, Dakar (SEN), 1996/12/03-05. ISBN: 2-7099-1423-9. Available at: https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010016074

Dilla, A. M., Smethurst, P. J., Barry, K., Parsons, D. and Denboba, M. A. (2019) Tree pruning, zone and fertiliser interactions determine maize productivity in the *Faidherbia albida* (Delile) A. Chev Parkland agroforestry system of Ethiopia. *Agroforestry Systems*, 93(5), 1897–1907. Available at: https://doi.org/10.1007/s10457-018-0304-9

Eguiluz-Piedra, T. and Zobel, B. J. (2007) Geographic variation in wood properties of *Pinus tecunumanii*. *Wood and Fiber Science*, 18(1), 68–75. Available at: https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/963

Gérard, J., Guibal, D., Cerre, J. C. and Paradis, S. (2016) *Atlas des bois tropicaux – Caractéristiques technologiques et utilisations*. Éditions Quae. RD 10, 78026 Versailles Cedex. 1002 p.

Gérard, J., Paradis, S. and Thibaut, B. (2019) Survey on the chemical composition of several tropical wood species. *Bois et Forêts des Tropiques*, 342, 79–91.

Kini, L. (2018) Utilisation des gousses de *Faidherbia albida* (Del.) A. Chev dans l'alimentation des bovins en zones urbaine et péri-urbaine de la ville de Banfora (Burkina Faso). Burkina Faso. Mémoire du fin de cycle d'ingénieur du développement rural: option élevage, Institut du développement rural de Burkina Faso, 61p.

Koech, G., Ofori, D., Muigai, A. W., Muriuki, J., Anjarwalla, P. and Mowo, J. G. (2016) Variation in the response of eastern and southern Africa provenances of *Faidherbia albida* (Delile A. Chev) seedlings to water supply: A greenhouse experiment. *Global Ecology and Conservation*, 8, 31–40. Available at: https://doi.org/10.1016/j.gecco.2016.08.005

Kokutse, A. D., Brancheriau, L. and Chaix, G. (2010) Rapid prediction of shrinkage and fibre saturation point on teak (*Tectona grandis*) wood based on near-infrared spectroscopy. *Annals of Forest Science*, 67(4), 403. Available at: https://doi.org/10.1051/forest/2009123

Kržišnik, D., Brischke, C., Lesar, B., Thaler, N. and Humar, M. (2019) Performance of wood in the Franja partisan hospital. *Wood Material Science & Engineering*, 14(1), 24–32. https://doi.org/10.1080/17480272.2018.1438512

Masseran, C. and Mariaux, A. (1985) Anisotropie de retrait et structure du bois: recherche de l'influence des caractères morphologiques transverses des fibres. *Bois et forêts des tropiques*, 209, 35–47. Available at: https://doi.org/10.19182/bft1985.209.a19537

Mazet, J. and Nepveu, G. (1991) Relations entre caractéristiques de retrait et densité du bois chez le pin sylvestre, le sapin pectiné et l'épicéa commun. *Annals of Forest Science*, 48, 87–100. Available at: https://doi.org/10.1051/forest:19910107

Mignon, A. and Do, F. (1999) *ACFLOW – Un modèle d'analyse des transferts hydriques chez un acacia phréatophyte* (Dakar: IRD). 25 p. Available at: http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010020525

Roupsard, O., Ferhi, A., Granier, A., Pallo, F., Depommier, D., Mallet, B., Joly, H. I. and Dreyer, E. (1999) Reverse phenology and dry-season water uptake by *Faidherbia albida* (Del.) A. Chev. in an agroforestry parkland of Sudanese West Africa. *Functional Ecology*, 13, 460–472. Available at: https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.1999.00345

Segla, K. N., Adjonou, K., Rabiou, H., André Bationo, B., Mahamane, A., Guibal, D., Kokou, K., Chaix, G., Kokutse, A. D. and Langbour, P. (2020) Relations between the ecological conditions and the properties of *Pterocarpus erinaceus* Poir. wood from the Guinean-Sudanian and Sahelian zones of West Africa. *Holzforschung*, 74(11), 999–1009. Available at: https://doi.org/10.1515/hf-2019-0250

Segla, K. N., Kokutse, A. D., Adjonou, K., Langbour, P., Chaix, G., Guibal, D. and Kokou, K. (2015) Caractéristiques biophysiques du bois de *Pterocarpus erinaceus* (Poir.) en zones guinéenne et soudanienne au Togo. *Bois et Forêts des Tropiques*, 324, 51–64. Available at: https://doi.org/10.19182/bft2015.324.a31266

Sileshi, G. W. (2016) The magnitude and spatial extent of influence of *Faidherbia albida* trees on soil properties and primary productivity in drylands. *Journal of Arid Environments*, 132, 1–14. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.03.002

Traoré, B. (2009) Influence de la structure anatomique et des métabolites secondaires sur les propriétés physiques et la qualité acoustique du bois de vène (*Pterocarpus erinaceus* – Poir.) provenant du Mali. Thèse de Doctorat, Département des Sciences du Bois et de la Forêt, Université Laval, Québec, Canada, 206 p. Available at: http://hdl.handle.net/20.500.11794/21319

Wood, P. J. (1989) *Faidherbia albida (Del.) A. Chev. (Synonyme: Acacia albida Del.): A Monograph* (Nogent-sur-Marne: CTFT). 66 p., ISBN: 2-85411-004-8. Available at: https://agritrop.cirad.fr/547995/

Variations des caractéristiques physiques et mécaniques du bois de *Balanites aegyptiaca* en fonction de trois provenances

Dao Dougabka[1, 2, 3]
Jean Gérard[1, 2]
Tikri Bianzeube[3]
Morgane Dendoncker[4]
Caroline Vincke[4]
Rémy Marchal[5]
Daniel Guibal[1, 2]
Alban Guyot[1, 2]

[1] Cirad
UPR BioWooEB
34398 Montpellier
France

[2] BioWooEB
Univ Montpellier, Cirad
Montpellier
France

[3] Université polytechnique de Mongo
BP 4377
N'Djamena
Tchad

[4] Earth and Life Institute
Université catholique de Louvain
Croix du Sud, 2 L7.05.09
1348 Louvain-la-Neuve
Belgique

[5] HESAM Université
LABOMAP
Arts et Métiers Institute of Technology
71250 Cluny
France

Auteur correspondant / Corresponding author:
Dao DOUGABKA –
dougabkadao@yahoo.fr

Photo 1.
Arbre n° 2 (N'Djamena).
Tree No. 2 (N'Djamena).
Photo D. Dougabka.

Doi : 10.19182/bft2021.349.a36776 – Droit d'auteur © 2021, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 15 janvier 2021 ; date d'acceptation : 1er avril 2021 ; date de publication : 1er septembre 2021.

Licence Creative Commons :
Attribution - 4.0 International.
Attribution-4.0 International (CC BY 4.0)

Citer l'article / To cite the article
Dougabka D., Gérard J., Bianzeube T., Dendoncker M., Vincke C., Marchal R., Guibal D., Guyot A., 2021. Variations des caractéristiques physiques et mécaniques du bois de *Balanites aegyptiaca* en fonction de trois provenances. Bois et Forêts des Tropiques, 349 : 5-19. Doi : https://doi.org/10.19182/bft2021.349.a36776

Bois et Forêts des Tropiques – ISSN: L-0006-579X
Volume 349 – 3rd quarter – September 2021 – p. 5-19
FOCUS / PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF *BALANITES AEGYPTIACA* WOOD

D. Dougabka, J. Gérard, T. Bianzeube,
M. Dendoncker, C. Vincke,
R. Marchal, D. Guibal, A. Guyot

RÉSUMÉ

Variations des caractéristiques physiques et mécaniques du bois de *Balanites aegyptiaca* en fonction de trois provenances

Balanites aegyptiaca est une espèce caractéristique et emblématique des zones sèches d'Afrique et d'Asie. Elle revêt une grande importance socio-économique dans toute sa zone naturelle de répartition du fait de ses multiples usages. Toutefois, les propriétés technologiques de son bois sont mal connues, d'où des utilisations parfois inappropriées mais qui pourraient être élargies. Afin de mieux adapter ses applications à ses caractéristiques, nous avons déterminé les indicateurs de stabilité physique (masse volumique, infradensité, retrait radial total, retrait tangentiel total, retrait volumique total et point de saturation des fibres) et les indicateurs de comportement mécanique (module d'élasticité longitudinal, contrainte de rupture en flexion et compression) de ce bois. Quatre-vingt-treize éprouvettes prélevées dans 13 arbres provenant des zones sahélienne et soudanienne tchadiennes, et de la zone sahélienne sénégalaise ont été testées. Les résultats obtenus montrent que, pour les trois provenances, le bois de *B. aegyptiaca* est mi-lourd (797 kg/m^3) avec une stabilité dimensionnelle moyenne : l'anisotropie de retrait est supérieure à 2 (2,2), le retrait radial total et le retrait tangentiel total sont moyens, respectivement égaux à 4 % et 8,5 %. Ses caractéristiques mécaniques sont moyennes (contraintes de rupture en compression et flexion statique respectivement égales à 49,4 MPa et 104,5 MPa) à faible (module d'élasticité longitudinal de 10 473 MPa). Une comparaison des résultats obtenus en fonction des zones de prélèvement a mis en évidence des tendances variables selon les caractéristiques étudiées. Ces variations entre les trois provenances restent cependant limitées. Les résultats de l'étude montrent que le bois de *B. aegyptiaca* pourrait être utilisé de façon appropriée sous forme de matériau pour une plus large gamme d'emplois, sous réserve de la mise en place d'une gestion adaptée permettant sa restauration par plantation.

Mots-clés : *Balanites aegyptiaca*, bois, propriétés mécaniques, propriétés physiques, provenance sahélienne, provenance soudanienne, Sénégal, Tchad.

ABSTRACT

Variations in the physical and mechanical properties of *Balanites aegyptiaca* wood from three provenances

Balanites aegyptiaca is a characteristic and emblematic tree species native to the dry zones of Africa and Asia. It has considerable socio-economic importance throughout its natural range of distribution because of its multiple uses. Despite this, the technological properties of its wood are not well known, hence sometimes inappropriate uses but potential for others. In order to match applications to characteristics of the wood, we determined physical stability indicators (density, infradensity, total radial shrinkage, total tangential shrinkage, total volumetric shrinkage and fibre saturation point) and mechanical behaviour indicators (longitudinal modulus of elasticity, bending strength and compression strength). Ninety-three specimens taken from 13 trees from the Sahelian and Sudanian zones in Chad and the Sahelian zone in Senegal were tested. Our results show that *B. aegyptiaca* wood from these three provenances is medium-heavy (797 kg/m^3) with moderate dimensional stability: shrinkage anisotropy is above 2 (2.2) and total radial and tangential shrinkage rates are medium at 4 % and 8.5 % respectively. Its mechanical characteristics are medium (static bending and compression strength at 49.4 MPa and 104.5 MPa respectively) to weak (longitudinal modulus of elasticity at 10,473 MPa). A comparison of the results obtained according to the provenance of the specimens showed variable tendencies depending on the characteristics analysed, although the variations between the three provenances are limited. Our study results show that the use of *B. aegyptiaca* wood as a material could be appropriate for a wider range of purposes, on condition that suitable management methods are in place with a view to their restoration by planting.

Keywords: *Balanites aegyptiaca*, wood, mechanical properties, physical properties, Sahelian provenance, Sudanian provenance, Senegal, Chad.

RESUMEN

Variaciones en las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Balanites aegyptiaca* según tres orígenes distintos

Balanites aegyptiaca (datilero del desierto) es una especie característica y emblemática de las zonas secas de África y Asia. Tiene una gran importancia socioeconómica en su área de distribución natural debido a sus múltiples usos. Sin embargo, no se conocen bien las propiedades tecnológicas de su madera, lo que da lugar a usos a veces inadecuados y que podrían ampliarse. Para adaptar mejor sus aplicaciones a sus propiedades, determinamos los indicadores de estabilidad física (densidad, infradensidad, contracción radial total, contracción tangencial total, contracción volumétrica total y punto de saturación de las fibras) y los indicadores de comportamiento mecánico (módulo de elasticidad longitudinal, tensión de ruptura en flexión y compresión) de esta madera. Se analizaron noventa y tres muestras tomadas de trece árboles de las zonas saheliana y sudanesa chadianas y de la zona saheliana senegalesa. Los resultados obtenidos muestran que para las tres procedencias, la madera de *B. aegyptiaca* es medianamente pesada (797 kg/m^3) con una estabilidad dimensional media: la anisotropía de contracción es superior a 2 (2,2), la contracción radial total y la contracción tangencial total son medias, respectivamente iguales al 4 % y al 8,5 %. Sus características mecánicas son medias (tensiones de ruptura en compresión y flexión estática iguales a 49,4 MPa y 104,5 MPa respectivamente) con un bajo módulo de elasticidad longitudinal (de 10 473 MPa). La comparación de los resultados obtenidos según las zonas de muestreo reveló tendencias variables en función de las características estudiadas. Sin embargo, estas variaciones entre los tres orígenes siguen siendo limitadas. Los resultados del estudio demuestran que la madera de *B. aegyptiaca* podría utilizarse adecuadamente como material para una mayor variedad de usos, siempre que se lleve a cabo una gestión adecuada que permita su restauración por plantación.

Palabras clave: *Balanites aegyptiaca*, madera, propiedades mecánicas, propiedades físicas, origen saheliano, origen sudanés, Senegal, Chad.

Introduction

Balanites aegyptiaca, appelé dattier du désert ou « savonnier » au Tchad, est un arbre épineux pouvant atteindre 17 m de haut pour un diamètre de fût allant jusqu'à 60 cm (Hall, 1992, 2004). Cette espèce de la famille des Zygophyllaceae, emblématique des zones arides, est très appréciée par les populations locales de toute sa zone naturelle de répartition. Elle répond en effet à une très large gamme d'emplois : usages alimentaires de parties de l'arbre (feuilles, pulpe des fruits, amandes), applications médicinales, fabrication de poisons utilisés pour la pêche, de savon pour la lessive, d'encre, de teinture pour les cuirs (Creac'h, 1940 ; Le Floc'h et Aronson, 2013 ; Dendoncker *et al.*, 2015 ; Adamou *et al.*, 2020). Son aire de répartition est très étendue. L'arbre peut être présent dans des régions dont la pluviométrie varie de 100 à 1 000 mm (Le Floc'h et Aronson, 2013) ; il peut vivre plus de 100 ans (Weber et Montes, 2010). Cette espèce est surtout présente dans les zones arides d'Afrique.

Le dattier du désert a fait l'objet d'études qui portent essentiellement sur l'huile extraite de ses graines, qui présente des propriétés exceptionnelles antioxydantes, anti-inflammatoires et antivirales (Singh *et al.*, 2020 ; Nitiema *et al.*, 2020 ; Khamis *et al.*, 2020 ; Iroha et Hamilton-Amachree, 2019). En revanche, les caractéristiques de son bois ont été très peu étudiées bien qu'il soit très utilisé et apprécié localement du fait de ses propriétés mécaniques, de son haut pouvoir calorifique et de sa bonne résistance aux insectes (Le Floc'h et Aronson, 2013 ; Hall, 2004 ; Creac'h, 1940). Cette espèce est surtout utilisée en construction (Ganaba *et al.*, 2004), pour la fabrication d'outils agricoles (manche de houe, hache…), d'ustensiles de cuisine (mortier, pilon, planche à découper…), de tablettes pour l'écriture des versets coraniques, et comme source d'énergie.

Les quelques études disponibles sur le bois de *B. aegyptiaca* portent sur sa structure anatomique (Parameswaran et Conrad, 1982), sur la corrélation entre la densité et la croissance des arbres (Weber et Montes, 2010), et sur les relations entre la structure anatomique du bois et ses propriétés physiques et mécaniques (Mohammed, 2019).

Présentant un fort potentiel pour le Sahel du fait de sa tolérance à la sécheresse (Adamou *et al.*, 2020 ; Khamis *et al.*, 2015 ; Andersen et Krzywinski, 2007 ; Gonzalez, 2001 ; Bernus, 1979), le développement de cette essence constitue un enjeu important pour plusieurs pays de cette région qui font face au problème de l'avancée de la désertification. *Balanites aegyptiaca* a été retenue parmi les quatre espèces d'arbres à utiliser pour le projet de la grande muraille verte d'Afrique, projet initialement conçu comme une zone de plantation de 15 km de large et d'environ 7 800 km de long, du Sénégal jusqu'à Djibouti en passant par 11 pays, qui est maintenant pensé comme une opportunité pour renforcer la résilience des écosystèmes (Goffner *et al.*, 2019). Compte tenu de son intérêt majeur et des perspectives d'utilisation qu'offre cette espèce, il est apparu important de mieux connaître les propriétés et le comportement technologique de son bois, afin de développer et mieux adapter ses applications à ses caractéristiques, et de favoriser l'adéquation qualité-emploi. Ce bois est déjà très utilisé localement sous forme de bois ronds pour la fabrication artisanale de petits objets, ainsi qu'en construction : grosses branches et troncs de petit diamètre pour la toiture des cases traditionnelles, tronc entier pour leur poteau central.

Afin de répondre aux objectifs de cette étude, nous nous sommes intéressés aux caractéristiques technologiques suivantes et à leurs variations selon les provenances :

- indicateurs de stabilité physique du bois : masse volumique à 12 % d'humidité et infradensité, retrait total de séchage (radial, tangentiel et volumique), et point de saturation des fibres. Ces caractéristiques sont des indicateurs majeurs de la qualité du bois et de sa stabilité après mise en œuvre (Guibal *et al.*, 2015 ; Segla *et al.*, 2015 ; Hounlonon *et al.*, 2017) ; pour rappel, le taux d'humidité d'une pièce de bois est le rapport entre la masse d'eau qu'elle contient (différence entre sa masse humide et sa masse anhydre) et sa masse anhydre ;
- indicateurs de comportement mécanique à 12 % d'humidité : module d'élasticité longitudinal en flexion, contrainte de rupture en flexion statique et contrainte de rupture en compression longitudinale (Guibal *et al.*, 2015 ; Langbour *et al.*, 2008 ; Morel *et al.*, 2017).

Matériels et méthodes

Échantillonnage et méthode d'obtention des éprouvettes d'essai

Le matériel végétal a été prélevé dans deux pays sahéliens, le Tchad et le Sénégal (figure 1). L'échantillonnage a été réalisé en tenant compte de l'état sanitaire des arbres (arbres apparaissant bien portants avec un port droit) et de leurs données dendrométriques : hauteur totale et circonférence du tronc (tableau I).

Au Tchad, les échantillons ont été prélevés dans deux zones climatiques différentes, la zone sahélienne (région de N'Djamena avec une pluviométrie moyenne annuelle de 556 ± 121 mm, et une température de 15 °C pour la moyenne

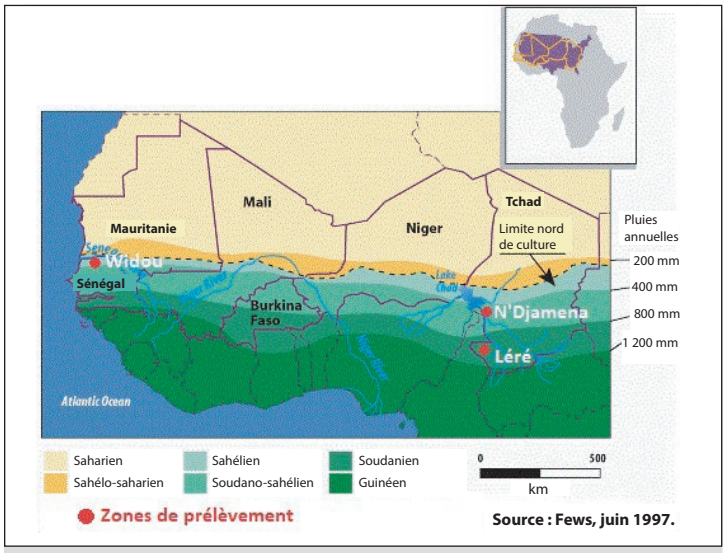


Figure 1.
Zones d'étude.
Study areas.

Tableau I.
Coordonnées GPS des prélèvements et données dendrométriques.
GPS coordinates of the samples and dendrometric data.

Provenance	N° pied	Longitude (degrés décimaux)	Latitude (degrés décimaux)	Hauteur h du tronc (cm)	Diamètre D à h = 1 m (cm)	Élancement du tronc (h/D)
Tchad zone sahélienne	1	15,11338	12,05515	162	20,6	7,9
	2	15,11248	12,05421	187	24,3	7,7
	3	15,11191	12,05438	170	27,8	6,1
	4	15,11366	12,05473	167	25,4	6,6
Tchad zone soudanienne	1	14,08274	9,64513	179	22,8	7,9
	2	14,08517	9,64718	185	24,6	7,5
	3	14,08312	9,64235	177	25,5	6,9
Sénégal zone sahélienne	1	– 15,33447	15,9028	142	34,1	4,2
	2	– 15,32110	15,91606	180	28,3	6,7
	3	– 15,32230	15,93358	137	31,5	4,4
	4	– 15,29183	15,98063	144	31,5	4,6
	5	– 15,30823	15,99890	155	25,5	6,1
	6	– 15,30741	16,05847	196	28,6	6,9

Photo 2.
Arbre n° 2 (Léré).
Tree No. 2 (Léré).
Photo D. Dougabka.

des minimas du mois le plus froid et de 44 °C pour la moyenne des maximas du mois le plus chaud) et la zone soudanienne (région de Léré avec une pluviométrie annuelle moyenne de 860 ± 144 mm, et une température moyenne mensuelle allant de 25 à 35 °C, entre 1980 et 2015). En juillet 2018, quatre arbres ont été prélevés dans la région de N'Djamena et trois à Léré, sur des terrains sablo-argileux (photos 1 et 2). Les coordonnées GPS des prélèvements sont données dans le tableau I.

Au Sénégal, les échantillons ont été prélevés en zone sahélienne en avril 2016, plus précisément dans les alentours du village de Widou Thiengoly situé au nord du pays (pluviométrie moyenne annuelle de 298 ± 87 mm et température moyenne mensuelle comprise entre 20 à 38 °C, entre 1940 et 2015). L'échantillonnage est constitué de six arbres prélevés sur des sols sablo-argileux. Les coordonnées GPS des prélèvements et les données dendrométriques sont présentées dans le tableau I.

Dans les deux pays et les trois zones de prélèvement, la densité d'arbres à l'hectare est faible, estimée à moins de 5 arbres à l'hectare, et n'influe donc pas sur les caractéristiques physiques et mécaniques du bois.

Les éprouvettes utilisées pour les essais ont été obtenues selon le processus suivant (figure 2) :

- chaque arbre a été abattu à 50 cm au-dessus du sol ; cette hauteur traditionnelle d'abattage facilite l'opération d'abattage manuel à la hache ;
- dans chaque tronc, la première bille d'environ 1 m de long au-dessus de la découpe a été prélevée (photo 3) ;
- les billes ont été transportées dans une scierie où elles ont été débitées en plateaux diamétraux de 60 cm de longueur et 6 cm d'épaisseur à l'aide d'une scie à ruban ;
- les plateaux ont fait l'objet d'un premier séchage naturel de trois mois sous abri sur le site de débit, puis ont été stabilisés au Cirad à Montpellier en chambre climatique à 20 °C et 65 % d'humidité relative (conditions climatiques permettant une stabilisation du bois à un taux d'humidité théorique de 12 %) ;

Photo 3.
Billons prélevés après abattage.
Bucked wooden log after felling.
Photo D. Dougabka.

▪ après trois semaines de stabilisation des bois, les sections transversales des plateaux ont été marquées pour repérer la position des ébauches d'éprouvettes destinées aux essais ; le marquage a été réalisé de façon à respecter la bonne orientation des sections des éprouvettes suivant la direction radiale et la direction tangentielle ;
▪ les ébauches (section nominale augmentée d'une surcote) ont été débitées dans les plateaux puis de nouveau stabilisées sous atmosphère contrôlée à 20 °C et 65 % d'humidité relative jusqu'à obtenir un poids constant ;
▪ après stabilisation finale, ces ébauches ont été usinées en barreaux de 20 x 20 mm² de section (dimension radiale x dimension tangentielle) et de longueur égale à la longueur du plateau ; dans ces barreaux, trois groupes d'éprouvettes de même section 20 x 20 mm² mais de longueurs L différentes ont été prélevés en fonction du type d'essai à réaliser : L = 360 mm pour les essais de flexion (contrainte de rupture et module d'élasticité longitudinal) ; L = 60 mm pour les essais de compression ; L = 10 mm pour les propriétés physiques.

Tous les essais ont été réalisés au Cirad à Montpellier.

Méthodes d'essai

Propriétés physiques

Les propriétés physiques de référence étudiées sont les suivantes : masse volumique à 12 %, infradensité, retrait radial total de séchage, retrait tangentiel total de séchage, retrait volumique total, point de saturation des fibres et anisotropie de retrait déduite des retraits linéaires (Guibal *et al.*, 2015).

La masse volumique à 12 % est déterminée simultanément au module d'élasticité longitudinal. La méthode de mesure correspondante est décrite dans « Propriétés mécaniques » ci-après.

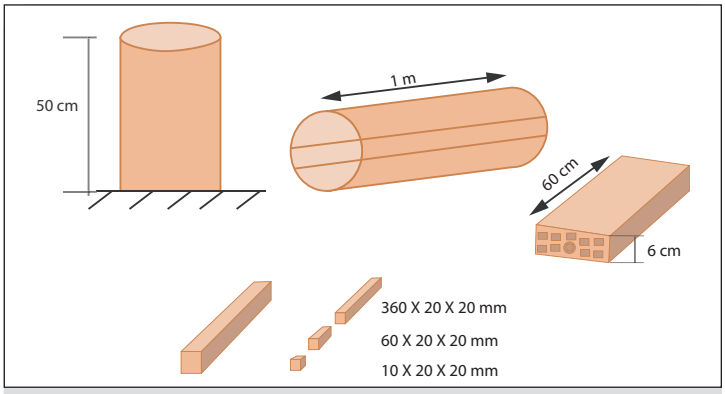


Figure 2.
Processus d'obtention des éprouvettes.
The process of obtaining the specimens.

Les cinq autres propriétés physiques sont déterminées sur les mêmes éprouvettes suivant un protocole unique.

Ces éprouvettes ont été, dans un premier temps, saturées dans de l'eau distillée pendant trois jours puis soumises à trois cycles de vide-pression dans un autoclave afin de chasser d'éventuelles poches d'air piégées dans le bois.

Après saturation, les éprouvettes ont été pesées et leurs dimensions radiale et tangentielle mesurées.

Les appareils utilisés pour ces mesures, ainsi que pour les mesures suivantes, sont les suivants : une balance de marque Sartorius de précision 0,001 g (photo 4) ; un comparateur de marque Mitutoyo de précision 0,001 mm (photo 5).

Le volume saturé des éprouvettes a été déterminé par la méthode de la double pesée (utilisation du principe de la poussée d'Archimède) : ce volume est déterminé par la masse du volume d'eau déplacé dans un bécher lors de l'immersion d'une éprouvette dans ce bécher rempli d'eau et pesé avant puis après l'immersion.

Après cette première étape de mesures à l'état saturé, et en vue de déterminer le point de saturation des fibres (PSF), les éprouvettes ont été stabilisées en enceinte climatique successivement à 85 % d'humidité relative de l'air et 30 °C (équilibre hygroscopique du bois voisin de 18 %), 65 % d'humidité relative de l'air et 20 °C (équilibre hygroscopique voisin de 12 %) puis 30 % d'humidité relative de l'air et 20 °C (équilibre hygroscopique voisin de 6 %).

Elles ont été enfin stabilisées jusqu'à l'état anhydre en étuve sèche à 103 °C. Selon la norme française NF EN 13183-1 de juin 2002, un échantillon de bois est considéré comme anhydre lorsque la variation de sa masse entre deux pesées successives dans un intervalle de 2 heures ne dépasse pas 0,1 %.

À chaque état stabilisé, la masse et les dimensions radiale et tangentielle des éprouvettes ont été mesurées. Ces mesures ont permis de déterminer les cinq propriétés étudiées et les deux propriétés déduites.

Bois et Forêts des Tropiques – ISSN: L-0006-579X
Volume 349 – 3rd quarter – September 2021 – p. 5-19

Photo 4.
Balance Sartorius.
Sartorius scale device.
Photo D. Dougabka.

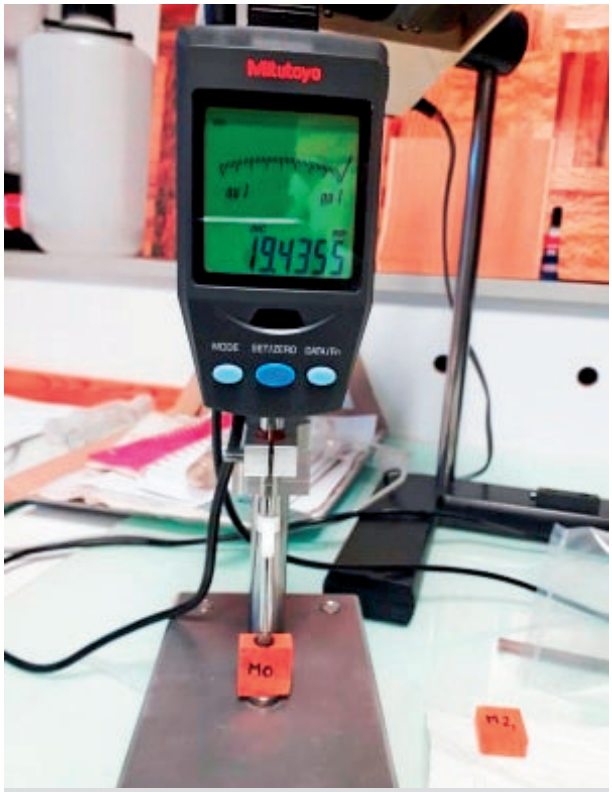


Photo 5.
Comparateur Mitutoyo.
Mitutoyo dial gauge.
Photo D. Dougabka.

Infradensité

L'infradensité « d » d'un échantillon est le rapport entre sa masse anhydre Ma et son volume saturé Vs. Elle s'exprime en kg/m^3. Cette caractéristique de référence présente l'avantage d'être facile à déterminer lorsque l'on ne dispose pas d'enceinte climatique pour stabiliser des échantillons à des conditions de température et d'humidité de l'air contrôlées. Elle permet aussi de calculer la biomasse anhydre du bois des troncs à partir du volume sous écorce mesuré lors d'inventaires forestiers.

$$d = \frac{M_a}{V_s} \quad \text{(équation 1)}$$

Retraits linéaires transversaux totaux

Les retraits linéaires transversaux de séchage constituent des indicateurs de la variation dimensionnelle du bois quand son humidité diminue en dessous du point de saturation des fibres. Cette variation dimensionnelle est différente suivant les directions tangentielle et radiale du bois. Ces retraits s'expriment en pourcentage et sont calculés à l'aide de la formule suivante (norme NF B 51-006, septembre 1985) :

$$R_{T,R} = \frac{e_s - e_o}{e_s} \times 100 \text{ (équation 2)}$$

où $R_{T,R}$ sont les retraits tangentiels et radiaux, R_T pour la direction tangentielle et R_R pour la direction radiale, e_s et e_o respectivement les dimensions des échantillons à l'état saturé et anhydre suivant la direction considérée (radiale ou tangentielle).

Quelle que soit l'essence de bois considérée, on a toujours $R_T > R_R$.

Anisotropie de retrait

L'anisotropie du retrait est déterminée par le rapport entre le retrait tangentiel et le retrait radial.

Ce paramètre constitue un bon indicateur du niveau des déformations subies par une pièce de bois soumise à des variations d'humidité, et de la stabilité d'un bois durant son séchage et sa mise en service (Gérard *et al.*, 2016).

Lorsque ce rapport $R_T \div R_R$ est supérieur à 2, on estime qu'un bois risque d'être instable en service et sujet aux fentes et aux déformations.

Retrait volumique total

Le retrait volumique total de séchage R_B correspond à la variation de volume d'une pièce de bois entre l'état saturé et l'état anhydre.

Le retrait longitudinal étant le plus souvent très faible par rapport aux retraits linéaires transversaux, la somme du retrait radial et du retrait tangentiel ($R_R + R_T$) constitue une bonne approximation du retrait volumique.

$$R_B = \frac{V_s - V_a}{V_s} \times 100 \approx R_R + R_T \text{ (équation 3)}$$

avec Vs = volume saturé et Va = volume anhydre.

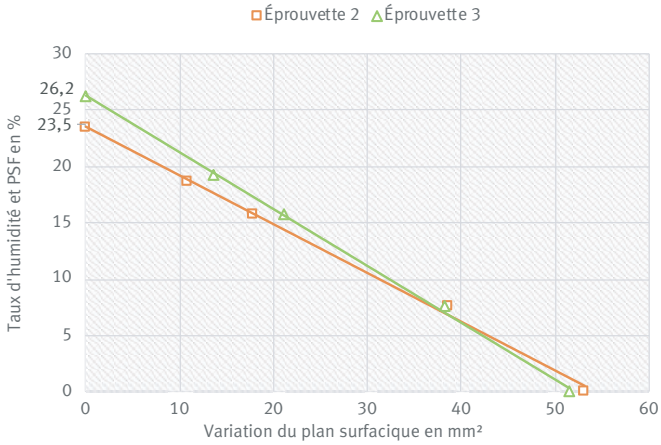


Figure 3.
Exemple de détermination du PSF de deux éprouvettes de *Balanites aegyptiaca* par calcul de l'ordonnée à l'origine des courbes [Taux d'humidité] = f [Variations surfaciques].
Example of the determination of the PSF of two Balanites aegyptiaca specimens by calculating the intercept of the curves [Moisture content] = f [Areal variations].

Point de saturation des fibres

Le point de saturation des fibres (PSF) est le taux d'humidité du bois saturé en eau liée, taux en dessous duquel les dimensions du bois varient en fonction de l'humidité ambiante.

Il est compris le plus souvent entre 20 % et 40 % suivant les essences, mais se situe généralement entre 25 % et 30 % (Gérard *et al.*, 2016).

Il est obtenu en stabilisant les échantillons de bois à différents taux d'humidité intermédiaires entre l'état saturé et l'état anhydre, à des conditions de température et d'humidité relative de l'air correspondant à des taux d'humidité théorique du bois successivement proches de 18 %, 12 % et 6 %. À chaque étape, la masse et les dimensions des éprouvettes sont mesurées. Ces dimensions permettent de déterminer les surfaces transversales correspondant au taux d'humidité de stabilité (exemple : surface transversale à 18 % d'humidité = dimension radiale à 18 % × dimension tangentielle à 18 %). Le taux d'humidité exact des échantillons est déterminé en fin d'expérimentation après leur pesée à l'état anhydre.

Le PSF est déterminé par l'ordonnée à l'origine des droites de régression entre les variations de surface transversale des échantillons et leur taux d'humidité (figure 3) : [taux d'humidité] = f [variations surfaciques]. Il correspond au taux humidité au-delà duquel les variations dimensionnelles sont nulles (Kokutse *et al.*, 2010). La surface transversale est le produit de la dimension radiale et de la dimension tangentielle de la section transversale de l'éprouvette.

Le PSF du bois est considéré comme faible pour des valeurs inférieures à 25 %, moyen pour des valeurs comprises entre 25 % et 35 %, et élevé pour des valeurs supérieures à 35 % (Gérard *et al.*, 2016).

Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques de référence étudiées sont le module d'élasticité longitudinal, la contrainte de rupture en flexion statique et la contrainte de rupture en compression longitudinale.

Mesure du module d'élasticité longitudinal et de la masse volumique par méthode vibratoire

Le module d'élasticité longitudinal du bois détermine son aptitude à se déformer de manière élastique, c'est-à-dire de manière réversible. Il est établi de façon normalisée sur les bois stabilisés en chambre climatique à 20 °C et 65 % d'humidité relative de l'air, soit une humidité théorique du bois de 12 %. Cette propriété caractérise la proportionnalité entre la charge et la déformation. C'est un indicateur de la rigidité du bois.

La méthode de mesure utilisée met en œuvre le dispositif BING© (*Beam Identification by Nondestructive Grading*). Cette méthode non destructive a été développée par le Cirad. Elle repose sur l'étude des vibrations d'une pièce de bois ou de tout autre matériau. Le dispositif permet de déterminer les caractéristiques élastiques (module d'élasticité longitudinal, module de cisaillement transverse) de tout matériau rigide. La mesure nécessite une éprouvette élancée, de géométrie régulière, sans défaut, et dont les conditions d'appui sont maîtrisées. L'éprouvette est soumise à des vibrations longitudinales ou transversales dont l'enregistrement et l'analyse conduisent à la détermination des caractéristiques recherchées.

Le principe de la mesure consiste à analyser les fréquences propres de résonance obtenues après une excitation impulsionnelle sur l'une des extrémités d'une éprouvette reposant sur deux bracelets élastiques de faible rigidité (Bordonné, 1989).

Les paramètres ainsi mesurés à l'aide du dispositif sont la densité du bois sec déterminée par la pesée de l'échantillon et la mesure de ses trois dimensions, le module spécifique déduit des fréquences propres (en mètres carrés par seconde carrée, m^2/s^2), et le rapport entre le module d'élasticité longitudinal et le module de cisaillement. Le module d'élasticité longitudinal est égal au produit de la densité par le module spécifique.

Le dispositif d'analyse est composé d'une balance, d'un support-échantillon, d'un microphone, d'un filtre amplificateur, d'un convertisseur de signal analogique en signal numérique, d'un tube de sollicitation à bille ou d'un maillet, et d'un ordinateur pour l'acquisition et le traitement des données par transformée de Fourrier rapide (photo 6).

Les mesures ont été réalisées sur des éprouvettes de 360 x 20 x 20 mm^3 stabilisées en conditions standards à 20 °C et 65 % d'humidité relative de l'air, soit une humidité théorique du bois de 12 %. L'espacement entre les deux bracelets élastiques est d'environ la moitié de la longueur de l'éprouvette ; la précision de cet écartement est sans impact sur la mesure (Bordonné, 1989).

Bois et Forêts des Tropiques – ISSN: L-0006-579X
Volume 349 – 3rd quarter – September 2021 – p. 5-19
FOCUS / PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF *BALANITES AEGYPTIACA* WOOD

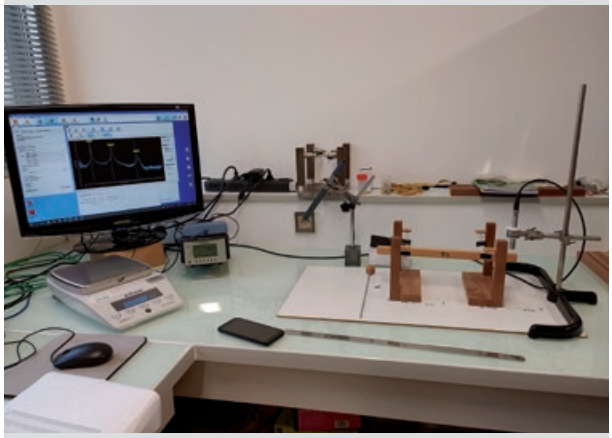


Photo 6.
Dispositif du test BING©.
BING © test device.
Photo D. Dougabka.

Photo 7.
Banc d'essais de compression.
Compression test bench.
Photo D. Dougabka.

Photo 8.
Banc d'essais de flexion.
Bending test bench.
Photo D. Dougabka.

Contrainte de rupture en compression longitudinale

La contrainte de rupture en compression longitudinale correspond à la contrainte qu'il est nécessaire d'appliquer suivant la direction parallèle au fil du bois pour obtenir la rupture d'une éprouvette parallélépipédique ayant la forme d'un barreau et orientée longitudinalement.

Cette caractéristique a été déterminée selon la méthode de mesure définie par la norme NF ISO 13061-17 (juin 2018). Les mesures sont effectuées sur des éprouvettes normalisées orientées longitudinalement, de dimensions 60 x 20 x 20 mm^3, et stabilisées en conditions standards. Les essais ont été réalisés sur une machine universelle de marque Adamel (photo 7) équipée d'une cellule de charge maximale de 100 kN. La machine est constituée d'un plateau rotulé fixe sur lequel l'échantillon est posé et d'une cellule de charge permettant d'appliquer la force de compression à l'échantillon. La vitesse de réalisation des essais est égale à 0,01 mm/s. L'acquisition des données (charge, déplacement) est faite à l'aide d'un ordinateur. La contrainte de rupture est égale au rapport entre la force appliquée et la section de l'éprouvette :

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{(équation 4)}$$

où σ est la contrainte de rupture en compression (MPa), F est la charge à la rupture (N), et A est la section de l'éprouvette (mm^2).

Contrainte de rupture en flexion statique

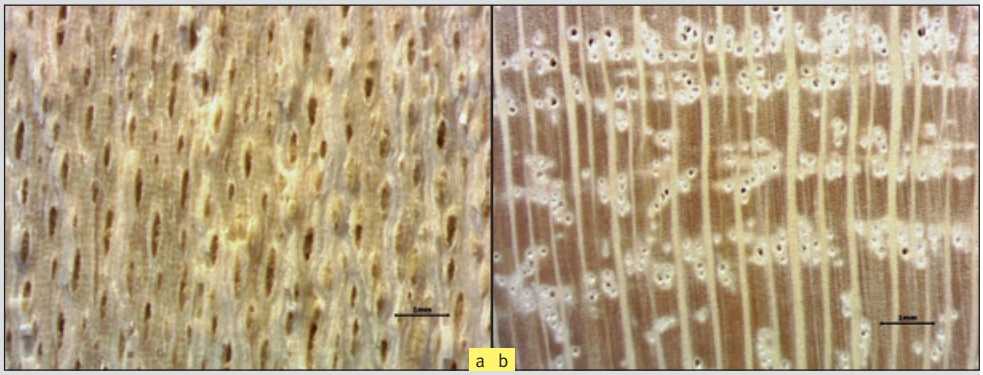
Cette caractéristique correspond à la contrainte qu'il est nécessaire d'appliquer par deux appuis dans la zone centrale d'une éprouvette parallélépipédique ayant la forme d'un barreau reposant sur deux appuis pour atteindre sa rupture après chargement progressif (flexion 4 points). Elle est déterminée sur des bois stabilisés en conditions standards, et dans notre cas suivant la norme française NF B 51-008 (26 juillet 2017). L'essai a été réalisé sur les éprouvettes de dimensions 360 x 20 x 20 mm^3 utilisées précédemment pour le module d'élasticité longitudinal. La machine utilisée est la même que celle pour les essais de compression, en adaptant le bâti (photo 8). La durée de l'essai est de 1,5 ± 0,5 min. La contrainte maximale est déterminée suivant la formule ci-dessous :

$$\sigma = \frac{3P(l-a)}{2bh^2} \quad \text{(équation 5)}$$

où σ est la contrainte de rupture en flexion (MPa), P est la charge totale de rupture (N), l est la distance entre les rouleaux du bâti (320 mm), a est la distance entre les rouleaux supérieurs (160 mm), b est la largeur de l'éprouvette (mm), et h est la hauteur de l'éprouvette (mm).

À l'issue de l'essai, le taux d'humidité des éprouvettes est déterminé suivant le protocole défini dans la norme NF EN 13183-1 (juin 2002).

Photo 9.
Bois de *Balanites aegyptiaca* en débit tangentiel.
Balanites aegyptiaca wood in tangential section.
Photo D. Guibal.



Photos 10.
Rayons ligneux en coupe tangentielle (10a) et en coupe transversale (10b).
Woody rays in tangential section (10a) and in cross section (10b).
Photo P. Langbour.

Résultats et discussion

Descriptif des bois

L'écorce des arbres exploités est crevassée, très écailleuse, et de couleur beige à brun-gris, relativement mince, jusqu'à 15 mm d'épaisseur. Lors de l'abattage, le tronc n'exsude pas de sève ni de résine particulière. Le bois est à pores diffus, de couleur jaune pâle à brun très clair pouvant virer au grisâtre en cas d'échauffures. L'aubier est indifférencié. Le fil du bois est légèrement ondulé (photo 9). Des cernes de croissance sont bien visibles, d'épaisseur très variable, entre 2 et 9 mm. Les rayons ligneux sont bien visibles, de 120 à 130 µm de large et 1 à 2 mm de hauteur, soit un rapport moyen largeur / hauteur égal à 0,09 (photos 10a et 10b). Le bois frais ne présente pas d'odeur très marquée. Lors du tronçonnage puis par la suite lors du débit à la scie à ruban, le bois apparaît relativement pelucheux. Le cœur des troncs est relativement bien centré ; *a priori*, le caractère pelucheux du bois n'est donc pas spécifiquement indicateur de bois de tension. Le sciage est cependant facile.

Statistiques descriptives des propriétés étudiées

Le tableau II présente le résultat des statistiques descriptives des résultats d'essais conduits sur un total de 279 éprouvettes, soit 93 pour chacun des trois formats, obtenues à partir des 13 arbres des trois provenances d'étude (zone sahélienne tchadienne, zone soudanienne tchadienne, zone sahélienne sénégalaise). Les éprouvettes sont sans défaut (fil droit, absence de nœud). L'aubier du bois de *B. aegyptiaca* étant indifférencié, les barreaux ont été prélevés à des distances variables du cœur. Le logiciel utilisé pour le traitement des résultats est XLSTAT 2020.5.1.

Résultats généraux

Pour les trois provenances confondues, les retraits radial et tangentiel totaux ont une moyenne respective de 4 % et 8,5 %, avec une dispersion des résultats plus de deux fois plus élevée pour le retrait radial que pour le retrait tangentiel (coefficient de variation respectivement de 23,1 % et 10,4 %).

L'anisotropie de retrait moyenne est de 2,2, avec un coefficient de variation de 17,8 %, soit une dispersion élevée liée à la dispersion élevée du retrait radial.

Le point de saturation des fibres moyen est de 24 %, avec un faible coefficient de variation (6,4 %) bien que les résultats soient la moyenne des trois provenances.

L'infradensité et la masse volumique ont des moyennes respectives de 652 kg/m^3 et 797 kg/m^3, avec une faible dispersion des résultats (coefficient de variation respectivement de 6,8 % et 5,4 %), ceci bien que, comme pour le PSF, les résultats soient la moyenne des trois provenances.

La contrainte de rupture en compression, en flexion statique, et le module d'élasticité longitudinal ont des moyennes respectives de 49,4 MPa, 104,5 MPa et 10473 MPa, et des coefficients de variation respectivement de 13,7 %, 12,4 % et 16,1 %, indicateurs d'une dispersion relativement élevée des résultats.

Influence des provenances sur les propriétés étudiées

Les échantillons ont été prélevés sur des sites géographiquement différents associés à des conditions de croissance très différentes liées à des climats différents, ce qui pourrait expliquer la forte dispersion des résultats, associée à un coefficient de variation élevé. Cette tendance est cependant infirmée pour trois caractéristiques, le point de saturation des fibres, l'infradensité et la masse volumique, dont les résultats sont globalement peu dispersés.

Tableau II.
Caractéristiques physiques et mécaniques de *Balanites aegyptiaca* des provenances sahélienne et soudanienne tchadienne et sahélienne sénégalaise.
Physical and mechanical characteristics of Balanites aegyptiaca from the Chadian and Senegalese Sahelian regions.

Provenance (nombre d'éprouvettes)	Statistique	H (%)	Rr (%)	Rt (%)	Rv (%)	Anis	PSF (%)	ID (kg/m³)	Mv (kg/m³)	C_{12} (MPa)	F_{12} (MPa)	E_{12} (MPa)	MS (Mm²/s²)
Résultats pour les trois provenances (279)	Moyenne	11,5	4,0	8,5	12,4	2,2	24,0	652	797	49,4	104,5	10 473	13,3
	Écart-type	1,3	0,9	0,9	1,1	0,4	1,5	44	41	6,8	13,0	1 682	2,6
	CV	11,7	23,1	10,7	9,0	17,8	6,4	6,8	5,2	13,7	12,4	16,1	19,9
Tchad, zone soudanienne (51)	Moyenne	12,8	3,3	9,3	12,5	2,6	24,5	655	814	40,9	100,1	9 182	11,5
	Écart-type	0,3	0,9	0,4	0,9	0,4	1,6	28	22	5,0	17,1	1 650	2
	CV	2	26,4	4,8	7,5	16,4	6,7	4,3	2,7	12,3	17,1	18,0	17,8
Tchad, zone sahélienne (60)	Moyenne	12,3	3,5	8,1	11,7	2,4	22,7	646	784	50,1	100,7	11 493	14,7
	Ecart-type	0,4	0,3	0,7	0,8	0,2	0,7	10	10	1,9	5,0	722	2,1
	CV	3	8,2	8,4	6,6	10,5	3,0	1,6	1,3	3,8	4,9	6,3	14
Sénégal, zone sahélienne (168)	Moyenne	9,9	4,5	8,3	12,7	2,0	24,2	653	793	52,0	110,1	10 897	13,6
	Écart-type	0,3	0,8	0,9	1,2	0,3	1,6	56	60	6,1	11,7	1 534	2,8
	CV	3	18,1	11,1	9,4	13,8	6,8	8,6	7,6	11,8	10,7	14,1	20,5

CV : coefficient de variation ; H : taux d'humidité de stabilisation à 20 °C et 65 % d'humidité relative de l'air ; Rr : retrait radial total ; Rt : retrait tangentiel total ; Rv : retrait volumique total ; Anis : anisotropie de retrait ; PSF : point de saturation des fibres ; ID : infradensité ; Mv : masse volumique à 12 % ; C_{12} : contrainte de rupture en compression longitudinale à 12 % d'humidité ; F_{12} : contrainte de rupture en flexion statique à 12 % d'humidité ; E_{12} : module d'élasticité longitudinal à 12 % d'humidité ; MS : module spécifique (= E_{12} / Mv).

L'influence des provenances sur les propriétés étudiées a été analysée en effectuant un test non paramétrique de Kruskal-Wallis.

Les résultats de ces tests ont été associés à une représentation graphique des distributions sous forme de box plots (figure 4).

La figure 4 montre ainsi que le retrait radial total est significativement plus élevé dans la zone sahélienne sénégalaise (4,5 %) que dans les deux provenances tchadiennes (3,3 % et 3,5 % ; figure 4a).

La différence de retrait tangentiel entre les zones sahéliennes tchadienne et sénégalaise est non significative (figure 4b), mais elle est significativement plus élevée dans la zone soudanienne tchadienne que dans les deux zones sahéliennes tchadienne et sénégalaise (respectivement 9,3 % contre 8,1 % et 8,3 %).

Cette tendance est l'inverse de celle observée pour les retraits radiaux totaux en termes d'effet provenances.

On n'observe aucune différence significative de retrait volumique entre les trois provenances (figure 4c). Ce résultat est lié au mode de calcul du retrait volumique en fonction des deux retraits linéaires, et à l'annulation des deux tendances inverses observées sur ces deux retraits.

L'anisotropie de retrait est significativement plus élevée sur les deux provenances tchadiennes (zone soudanienne et zone sahélienne) comparées à la zone sahélienne sénégalaise (figure 4d).

Le point de saturation des fibres dans la zone sahélienne tchadienne est significativement moins élevé que les valeurs obtenues en zone soudanienne tchadienne et en zone sahélienne sénégalaise (figure 4e)

Pour l'infradensité (figure 4f), aucune différence significative n'est observée entre les trois provenances.

Contrairement à l'infradensité, la masse volumique à 12 % est significativement plus élevée en zone soudanienne tchadienne qu'en zone sahélienne tchadienne et sénégalaise ; aucune différence significative n'est observée entre les deux zones sahéliennes (figure 4g).

Des trois caractéristiques mécaniques étudiées, la contrainte de rupture en compression (figure 4h) et le module d'élasticité longitudinal (figure 4j) présentent la même tendance : les valeurs obtenues en zone soudanienne tchadienne sont significativement moins élevées que celles de la zone sahélienne tchadienne et sénégalaise.

Pour la contrainte de rupture en flexion (figure 4i), aucune différence significative n'est observée entre les provenances.

La tendance observée pour le module d'élasticité longitudinal, la contrainte de rupture en flexion et la contrainte de rupture en compression est l'inverse de celle observée pour la masse volumique et l'infradensité : on constate que dans la zone d'étude, où la masse volumique et l'infradensité sont les plus élevées (Tchad, zone soudanienne), le module d'élasticité longitudinal et les contraintes de rupture en flexion et en compression sont les plus faibles, ce qui est contraire aux tendances observées en général. Ce résultat pourrait être lié à un taux très variable des extractibles dans le bois de *B. aegyptiaca* en relation avec la provenance.

Les variations du module spécifique, rapport entre le module d'élasticité longitudinal et la masse volumique, ont été analysées (figure 4h) car cette variable traduit souvent une adaptation aux conditions de croissance (Thibaut, 2016).

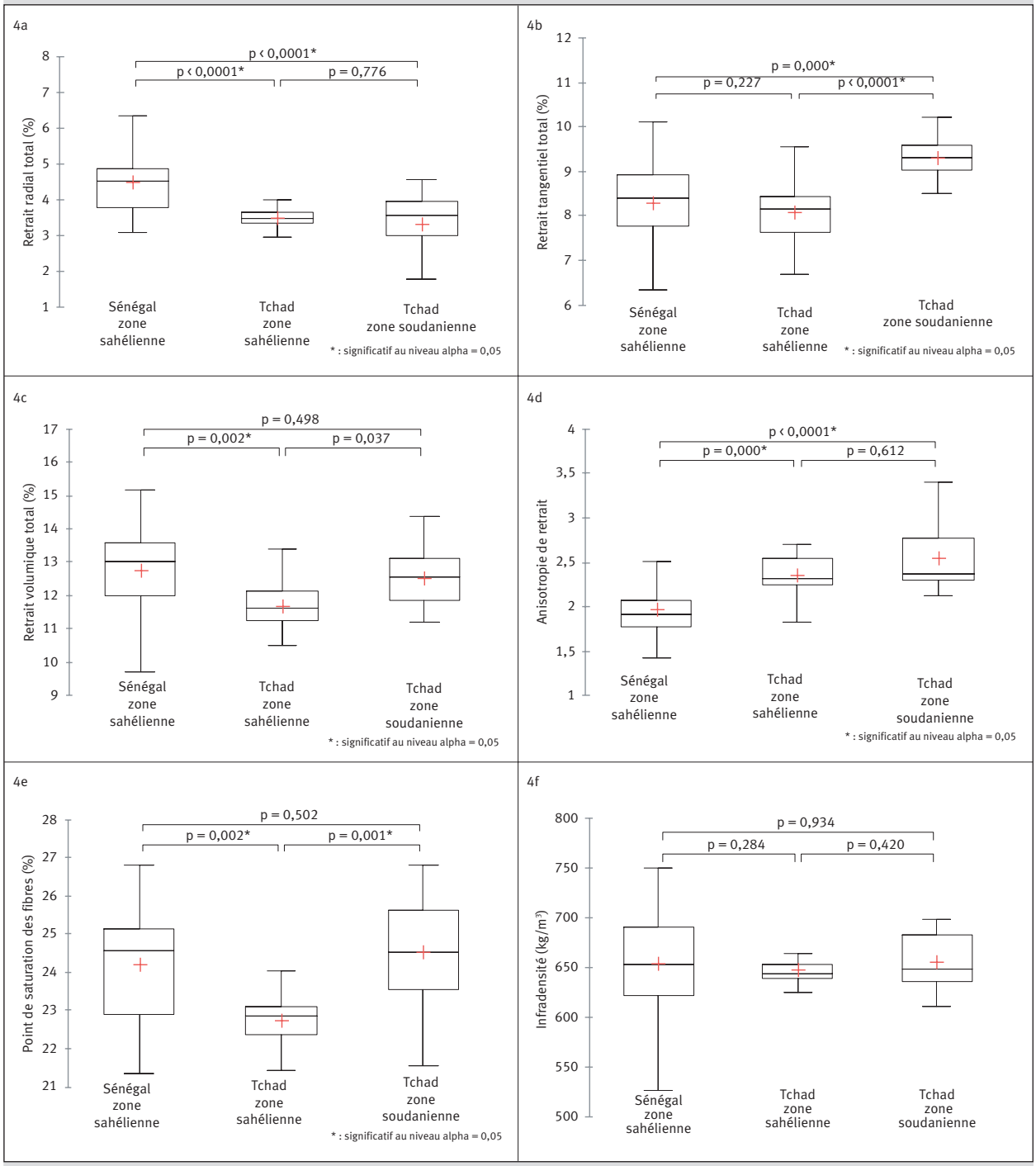


Figure 4.
Distributions des propriétés du bois de *Balanites aegyptiaca* en fonction de la provenance. 4.a. Comparaison du retrait radial total pour les trois provenances. 4b. Comparaison du retrait tangentiel total pour les trois provenances. 4c. Comparaison du retrait volumique total pour les trois provenances. 4d. Comparaison de l'anisotropie de retrait pour les trois provenances. 4e. Comparaison du point de saturation des fibres pour les trois provenances. 4f. Comparaison de l'infradensité pour les trois provenances.
Distributions of wood properties of Balanites aegyptiaca as a function of provenance. 4.a. Comparison of total radial shrinkage for the three provenances. 4b. Comparison of total tangential shrinkage for the three provenances. 4c. Comparison of total volumetric shrinkage for the three provenances. 4d. Comparison of shrinkage anisotropy for the three provenances. 4e. Comparison of fibre saturation point for the three provenances. 4f. Comparison of infradensity for the three provenances.

Bois et Forêts des Tropiques – ISSN: L-0006-579X
Volume 349 – 3rd quarter – September 2021 – p. 5-19
FOCUS / PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF *BALANITES AEGYPTIACA* WOOD

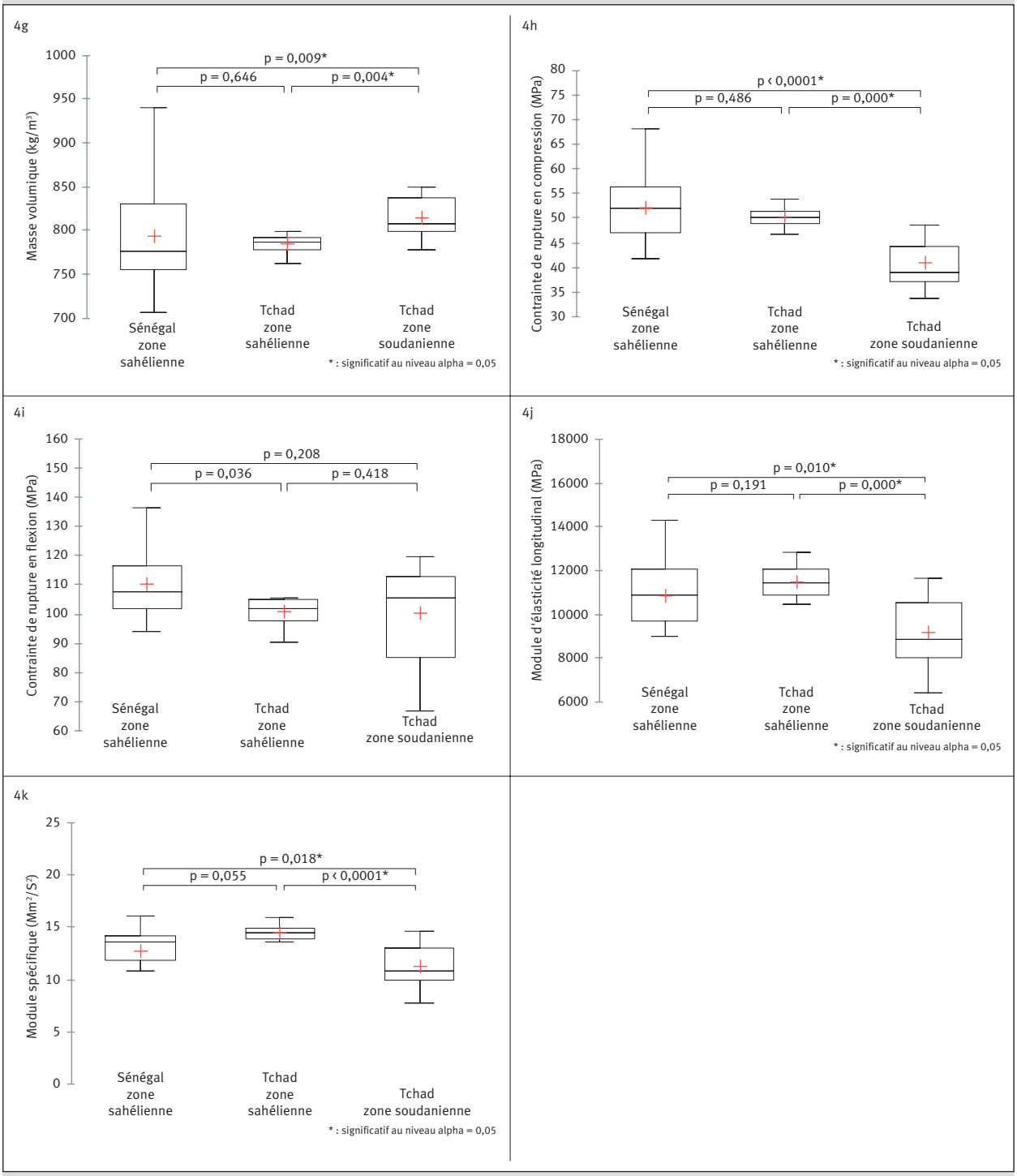


Figure 4 (suite).
Distributions des propriétés du bois de *Balanites aegyptiaca* en fonction de la provenance. 4g. Comparaison de la masse volumique pour les trois provenances. 4h. Comparaison de la contrainte de rupture en compression pour les trois provenances. 4i. Comparaison de la contrainte de rupture en flexion pour les trois provenances. 4j. Comparaison du module d'élasticité longitudinal pour les trois provenances. 4k. Comparaison du module spécifique pour les trois provenances.
Distributions of wood properties of Balanites aegyptiaca as a function of provenance. 4g. Comparison of density for the three origins. 4h. Comparison of compression strength at break for the three provenances. 4i. Comparison of bending strength for the three provenances. 4j. Comparison of longitudinal modulus of elasticity for the three provenances. 4k. Comparison of specific modulus of elasticity for the three provenances.

Quelle que soit la provenance, les modules spécifiques moyens obtenus apparaissent très faibles pour les arbres échantillonnés : 11,5 Mm²/s² en zone tchadienne soudanienne, 14,7 Mm²/s² en zone tchadienne sahélienne et 13,6 Mm²/s² en zone sahélienne sénégalaise. Ces faibles valeurs sont bien indicatrices d'arbres de savane (arbres courts et peu élancés). Pour comparaison, sur 3 110 séries d'essais physiques et mécaniques de la base de données Bois du Cirad correspondant à la caractérisation de plus de 1 000 espèces, seules 191 sont associées à un module spécifique inférieur à 15 Mm²/s², soit 6 % des essais. Le module spécifique moyen dans cette base de données est de 21,5 Mm²/s².

Qualification des bois de *B. aegyptiaca* étudiés par rapport à d'autres provenances

En se référant à la grille de qualification des bois proposée dans *l'Atlas des bois tropicaux* (Gérard *et al.*, 2016), le bois de *B. aegyptiaca* peut être classé comme un bois mi-lourd à lourd (masse volumique moyenne voisine de 800 kg/m³) avec une stabilité dimensionnelle moyenne : l'anisotropie de retrait est supérieure à 2 (2,2), le retrait radial total et le retrait tangentiel total sont moyens, respectivement égaux à 4 % et 8,5 %.

Le bois de *B. aegyptiaca* présente des contraintes de rupture en compression et en flexion moyennes, respectivement de 49,4 MPa et 104,5 MPa, et un module d'élasticité longitudinal faible (10 473 MPa). Le module spécifique moyen est très faible (13,1 Mm²/s²), ce qui est caractéristique d'arbres de savane.

Comme mentionné en introduction, les caractéristiques physiques et mécaniques du bois de *B. aegyptiaca* ont été très peu étudiées, l'essentiel des travaux sur les utilisations de cette espèce ayant porté sur les produits forestiers non ligneux. Trois sources de comparaison à nos résultats ont été identifiées (tableau III) : Mohammed (2019), Weber et Montes (2010), et Langbour *et al.* (2019). Pour les deux dernières études, les seules données disponibles concernent la masse volumique.

Pour les bois du Soudan (Mohammed, 2019), les résultats obtenus sont du même ordre de grandeur que ceux des bois prélevés au Tchad et au Sénégal pour la masse volumique (780 kg/m³ contre 799 kg/m³ et 793 kg/m³ respectivement pour les bois du Tchad et du Sénégal), la contrainte de rupture en compression (47,5 MPa contre respectivement 45,5 MPa et 52 MPa) et la contrainte de rupture en flexion statique (107,1 MPa contre respectivement 100,4 et 110,1 MPa). Ces mesures ont été effectuées à des taux d'humidité différents : bois stabilisés à 20 °C et 65 % d'humidité relative pour les provenances Tchad et Sénégal, et annoncés stabilisés à 7 % pour la provenance Soudan. Cependant, l'impact de cette différence de taux d'humidité de stabilisation sur les résultats reste négligeable.

En revanche, on observe pour la provenance Soudan un module d'élasticité longitudinal plus faible (8 813 MPa contre respectivement 10 337 MPa et 10 897 MPa) et des retraits de séchage plus élevés (5,6 % contre 3,4 % et 4,5 % pour le retrait radial, 11,5 % contre 8,7 % et 8,3 % pour le retrait tangentiel).

Par rapport aux bois étudiés au Tchad et au Sénégal, les bois du Soudan apparaissent donc moins stables et présentent une rigidité plus faible.

Pour onze provenances nigériennes, Weber et Montes (2010) ont obtenu une masse volumique moyenne de 627,2 kg/m³, inférieure aux résultats obtenus sur les bois du Tchad, du Sénégal et du Soudan. Pour cette même caractéristique, les résultats de Langbour *et al.* (2019) sont de 630 kg/m³ et 860 kg/m³ pour deux provenances du Sénégal, 780 kg/m³ et 820 kg/m³ pour deux provenances du Niger, 840 kg/m³ pour une provenance du Maroc et 760 kg/m³ pour une provenance du Burkina Faso. Chaque résultat correspond à une mesure sur une seule plaquette de bois. La masse volumique du bois de *B. aegyptiaca* apparaît donc éminemment variable en fonction de sa provenance.

Tableau III.
Comparaison des résultats obtenus sur les provenances Tchad et Sénégal par rapport aux provenances Soudan et Niger.
Comparison of the results obtained on the Chad and Senegal provenances versus the Sudan and Niger provenances.

	Tchad	Sénégal	Soudan*	Niger**
Retrait radial total (%)	3,4	4,5	5,6	
Retrait tangentiel total (%)	8,7	8,3	11,5	
Masse volumique (kg/m³)	799	793	780	627,2
Module d'élasticité longitudinal (MPa)	10 337	10 897	8 813	
Module spécifique (Mm²/s²)	13,1	13,6	11,30	
Contrainte de rupture en compression parallèle (MPa)	45,5	52	47,5	
Contrainte de rupture en flexion statique (MPa)	100,4	110,1	107,1	

* : Mohammed (2019) ; ** : Weber et Montes (2010).

Conclusion

Cette étude à caractère exploratoire a porté sur la détermination des principaux indicateurs de stabilité physique et de comportement mécanique du bois de *Balanites aegyptiaca*, et sur les variations de ces indicateurs suivant les zones de prélèvement : deux zones climatiques tchadiennes, la zone sahélienne et la zone soudanienne, et la zone sahélienne sénégalaise.

Les bois de *B. aegyptiaca* sont commercialisés et utilisés localement pour des usages multiples à vocations domestique, agricole et culturelle. Du fait de sa distribution disséminée dans son aire naturelle de répartition et de son caractère clairsemé, cette espèce ne fait l'objet d'aucune exploitation industrielle.

Cependant, l'élargissement des domaines d'utilisation de son bois est envisageable, toujours à l'échelle locale, d'où la nécessité d'améliorer les connaissances sur son comportement technologique. En outre, cette espèce apparaît prometteuse dans un contexte de changement climatique.

Une comparaison des résultats obtenus en fonction des zones de prélèvement a mis en évidence des tendances variables suivant les caractéristiques étudiées, que ce soit pour les indicateurs de stabilité physique (masse volumique et infradensité, retraits radial, tangentiel et volumique totaux, et point de saturation des fibres) ou ceux portant sur le comportement mécanique des bois (module d'élasticité longitudinal en flexion, contrainte de rupture en flexion statique et contrainte de rupture en compression longitudinale). Néanmoins, les caractéristiques déterminées sur les bois des trois provenances montrent que cette espèce peut être utilisée de façon appropriée sous forme de matériau pour une large gamme d'emplois.

En termes de perspectives, les différences liées à la provenance des bois selon les propriétés étudiées pourraient être expliquées en réalisant des mesures et essais complémentaires portant sur des différences de structure anatomique et de composition chimique des bois, et en ciblant des arbres pour lesquels l'âge peut être identifié.

Ainsi, la comparaison des angles des microfibrilles des bois suivant leur provenance, caractéristique liée aux conditions et à la vitesse de croissance des arbres, pourrait permettre d'expliquer les variations observées pour la masse volumique, d'une part, et les caractéristiques mécaniques, d'autre part. Le module spécifique est un bon indicateur de l'angle des microfibrilles mais l'analyse de ses variations n'a pas permis d'expliquer les différences observées entre les provenances. Les mesures d'angle des microfibrilles restent donc une caractéristique à étudier.

De même, la détermination comparée des taux d'extractibles et de leur composition selon la provenance des bois pourrait permettre de mieux comprendre l'origine des variations de retrait de séchage et les différences de tendance observées entre le retrait radial et le retrait tangentiel. En effet, la présence et la nature de ces extractibles influent directement sur le retrait du bois durant le séchage. De plus, la connaissance de ces caractéristiques chimiques permettrait de mieux comprendre l'origine de la bonne durabilité du bois de *B. aepgyptiaca* constatée dans son aire de production et d'utilisation.

Une meilleure compréhension de l'influence des conditions de croissance sur les propriétés du bois de *B. aegyptiaca* passe aussi par l'étude de bois d'autres régions où cette espèce est très présente : Nord-Cameroun, Égypte, Algérie, Zimbabwe, Israël, Arabie saoudite.

Cependant, le développement de l'emploi du bois de *B. aegyptiaca* ne peut être envisagé sans une gestion drastique de ses peuplements associée à un mode d'exploitation suffisamment rémunérateur pour les agriculteurs, et incitatif pour éviter que les arbres ne soient coupés trop jeunes pour la production de charbon.

En effet, malgré une stratégie de reproduction et des traits fonctionnels en faveur du maintien de cette espèce en milieu semi-aride, les peuplements naturels sont fragilisés par le phénomène de désertification et par la pression anthropique, et doivent faire l'objet d'une gestion adaptée pour assurer leur restauration. En l'état, ils ne peuvent faire l'objet que d'une exploitation très limitée à un niveau local.

Références bibliographiques

Adamou S., Abdoul-Salam A. I., Aissetou D. Y., 2020. Caractérisation de la population de *Balanites aegyptiaca* (L.) Del. et la perception de son potentiel socioéconomique dans la partie Sud-Ouest du Niger. International Journal of Biological and Chemical Sciences, 14 (5) : 1698-1715. https://www.ajol.info/index.php/ijbcs/article/view/199689

Andersen G. L., Krzywinski K., 2007. Mortality, recruitment and change of desert tree populations in a hyper-arid environment. PLoS One, 2 (2): e208. https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0000208

Bernus E., 1979. L'arbre et le nomade. Journal d'Agriculture Traditionnelle et de Botanique Appliquée, 26e année, bulletin n° 2, 103-128. https://doi.org/10.3406/jatba.1979.3793

Bordonné P. A., 1989. Module dynamique et frottement intérieur dans le bois. Mesures sur poutres flottantes en vibrations naturelles. Thèse de doctorat en sciences du bois, Institut national polytechnique de Lorraine, France, 109 p.

Creac'h P., 1940. Le *Balanites* ægyptiaca. Ses multiples applications au Tchad. Journal d'Agriculture Traditionnelle et de Botanique Appliquée, 20 (228) : 578-593. https://www.persee.fr/doc/jatba_0370-3681_1940_num_20_228_1576

Dendoncker M., Ngom D., Vincke C., 2015. Trees dynamics (1955-2012) and their uses in the Senegal's Ferlo region: insights from a historical vegetation database, local knowledge and field inventories. Bois et Forêts des Tropiques, 326 (4): 25-41. https://doi.org/10.19182/bft2015.326.a31281

Ganaba S., Ouadba J. M., Bognounou O., 2004. Plantes de construction d'habitations en région sahélienne. Bois et Forêts des Tropiques, 282 (2) : 11-17. https://revues.cirad.fr/index.php/BFT/article/view/20215

Gérard J., Guibal D., Cerre J.-C., Paradis S., *et al.*, 2016. Atlas des bois tropicaux – Caractéristiques technologiques et utilisations. Versailles, France, Éditions Quæ, 1 002 p.

Goffner D., Sinare H., Gordon L. J., 2019. The Great Green Wall for the Sahara and the Sahel Initiative as an opportunity to enhance resilience in Sahelian landscapes and livelihoods. Regional Environmental Change, 19: 1417-1428. https://doi.org/10.1007/s10113-019-01481-z

Gonzalez P., 2001. Desertification and a shift of forest species in the West African Sahel. Climate Research, 17 (2): 217-228. https://www.int-res.com/abstracts/cr/v17/n2/p217-228/

Guibal D., Langbour P., Gérard J., 2015. Propriétés physiques et mécaniques des bois. *In* : Mille G., Louppe D. (éds). Mémento du forestier tropical. Versailles, France, Éditions Quæ, 873-884. http://www.quae.com/fr/r4730-memento-du-forestier-tropical.html

Hall J. B., 2004. *Balanites aegyptiaca*. Enzyklopädie der Holzgewächse: Handbuch und Atlas der Dendrologie, 1-6. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9783527678518.ehg1995017

Hall J. B., 1992. Ecology of key African multipurpose tree species, *Balanites aegyptiaca* (Balanitaceae): The state of knowledge. Forest Ecology and Management, 50 (1-2): 1-30. https://doi.org/10.1016/0378-1127(92)90311-V

Hounlonon M. C., Kouchade C. A., Kounouhewa B. B., 2017. Propriétés physiques et mécaniques du bois de teck de provenances tanzanienne et locale au Bénin. Bois et Forêts des Tropiques, 331 (1) : 45-53. https://doi.org/10.19182/bft2017.331.a31325

Iroha N. B., Hamilton-Amachree A., 2019. Inhibition and adsorption of oil extract of *Balanites aegyptiaca* seeds on the corrosion of mild steel in hydrochloric acid environment. World Scientific News, 126: 183-197. http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.psjd-1003c17b-daef-4284-ba75-6447fbf36132

Khamis G., Saleh A. M., Habeeb T. H., Hozzein W. N., Wadaan M. A., Papenbrock J., *et al.*, 2020. Provenance effect on bioactive phytochemicals and nutritional and health benefits of the desert date *Balanites aegyptiaca*. Journal of Food Biochemistry, 44: e13229. https://doi.org/10.1111/jfbc.13229

Khamis G., Schaarschmidt F., Papenbrock J., 2015. Effect of water deficiency on different genotypes of *Balanites Aegyptiaca*. Procedia Environmental Sciences, 29: 49-50. https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.07.150.

Kokutse A. D., Brancheriau L., Chaix G., 2010. Rapid prediction of shrinkage and fibre saturation point on teak (*Tectona grandis*) wood based on near-infrared spectroscopy. Annals of Forest Science, 67 (4): 403. https://www.afs-journal.org/articles/forest/abs/2010/04/f09144/f09144.html?mb=1

Langbour P., Gérard J., Guibal D., Teissier du Cros R., 2008. Caractéristiques technologiques de *Swietenia macrophylla* King planté à la Martinique. Bois et Forêts des Tropiques, 298 (4) : 3-12. https://revues.cirad.fr/index.php/BFT/article/view/20363

Langbour P., Paradis S., Thibaut B., 2019. Description of the Cirad wood collection in Montpellier, France, representing eight thousand identified species. Bois et Forêts des Tropiques, 339 (1) : 7-16. https://doi.org/10.19182/bft2019.339.a31709

Le Floc'h E., Aronson J., 2013. Les arbres des déserts : enjeux et promesses. Arles, France, Éditions Actes Sud, 372 p.

Mohammed N. E. A. A., 2019. Relationship between anatomical properties and some physical and mechanical properties for five wood species growing in North Darfur-Sudan. Doctoral dissertation, Sudan University of Science & Technology. http://repository.sustech.edu/handle/123456789/23688

Morel H., Nicolini E., Bossu J., Blanc L., Beauchêne J., 2017. Qualité et usages du bois de cinq espèces forestières adaptées à la plantation à vocation de bois d'œuvre et testées en Guyane française. Bois et Forêts des Tropiques, 334 (4) : 61-74. https://doi.org/10.19182/bft2017.334.a31492

Nitiema L. W., Sombié P. A., Koala M., Del Fiore A., 2020. Phytochemical composition and antioxidant activity of *Balanites aegyptiaca*, *Securidaca longepedunculata* and *Acacia gourmaensis* used against seed-borne fungi in Burkina Faso. Current Journal of Applied Science and Technology, 39 (1): 79-87. https://www.journalcjast.com/index.php/CJAST/article/view/30483

Parameswaran N., Conrad H., 1982. Wood and bark anatomy of *Balanites aegyptiaca* in relation to ecology and taxonomy. IAWA Journal, 3 (2): 75-88. https://doi.org/10.1163/22941932-90000755

Segla K. N., Kokutse A. D., Adjonou K., Langbour P., Chaix G., Guibal D., *et al.*, 2015. Caractéristiques biophysiques du bois de *Pterocarpus erinaceus* (Poir.) en zones guinéenne et soudanienne au Togo. Bois et Forêts des Tropiques, 324 (2) : 51-64. https://doi.org/10.19182/bft2015.324.a31266

Singh Y., Sharma A., Singh N. K., Chen W. H., 2020. Development of bio-based lubricant from modified desert date oil (*Balanites aegyptiaca*) with copper nanoparticles addition and their tribological analysis. Fuel, 259: 116259. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116259

Thibaut B., 2016. Tree biomechanics and the transition from juvenile to mature wood. IAWS Annual Conference, Wood Science for the Future, Paris, France, 1-3 June 2016, 20 p. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01784796

Weber J. C., Montes C. S., 2010. Correlations and clines in tree growth and wood density of *Balanites aegyptiaca* (L.) Delile provenances in Niger. New Forests, 39 (1): 39-49. https://link.springer.com/article/10.1007/s11056-009-9153-8

Dougabka *et al.* – Contribution des auteurs

Rôle du contributeur	Noms des auteurs
Conceptualisation	D. Dougabka, J. Gérard
Gestion des données	D. Dougabka, J. Gérard
Analyse formelle	J. Gérard, D. Dougabka, R. Marchal
Acquisition du financement	J. Gérard, T. Bianzeube, D. Dougabka
Enquête et investigation	D. Dougabka, T. Bianzeube, M. Dendoncker, C. Vincke, D. Guibal, A. Guyot
Méthodologie	D. Dougabka, J. Gérard, R. Marchal
Gestion de projet	J. Gérard
Ressources	J. Gérard, D. Dougabka, T. Bianzeube, M. Dendoncker, C. Vincke, D. Guibal, A. Guyot, R. Marchal
Supervision	J. Gérard, R. Marchal, D. Guibal
Validation	D. Dougabka, J. Gérard, T. Bianzeube, M. Dendoncker, C. Vincke
Visualisation	D. Dougabka, J. Gérard
Écriture – Préparation de l'ébauche originale	D. Dougabka, J. Gérard, T. Bianzeube, M. Dendoncker, C. Vincke, D. Guibal
Écriture – Révision et édition	D. Dougabka, J. Gérard

Bois et Forêts des Tropiques - Revue scientifique du Cirad -
© Bois et Forêts des Tropiques © Cirad
Cirad - Campus international de Baillarguet, 34398 Montpellier Cedex 5, France - Contact : bft@cirad.fr - ISSN : L-0006-579X