



**Bois &
forêts**
des
tropiques

3^e trimestre 2021
n° 349

Bois & forêts des tropiques

Revue éditée par le Cirad
n° 349 / 3^e trimestre 2021

Rédacteur en chef

Jean-François Trébuchon

Rédacteurs scientifiques

Kévin Candelier
Vincent Freycon
Antoine Galiana
Valéry Gond
Jean Gérard
Jacques Tassin

Coordination éditoriale

Jean-François Trébuchon

Comité éditorial 2020-2022

Seheno Andriantsaralaza (Madagascar)
Samuel Assembe-Mvondo (Cameroun)
Loïc Brancheriau (France)
Stéphanie Carrière (France)
Adeline Fayolle (Belgique)
Isabel Garcia Drigo (Brésil)
Mohamed Tahar Elaieb (Tunisie)
Gerard Nounagnon Gouwakinnou (Bénin)
Isabel Gutierrez-Montes (Costa Rica)
Jean-Michel Harmand (France - Côte d'Ivoire)
Verina Ingram (Cameroun)
Lydie-Stella Koutika (République du Congo)
Anne Larson (Pérou)
Nassima Lassouane (Algérie)
Guillaume Lescuyer (France)
William Mala (Cameroun)
Lucas Jose Mazzei De Freitas (Brésil)
Florence Bobélé Niamke (Côte d'Ivoire)
Symphorien Ongolo (Allemagne)
Johan Oszwald (France)
Amadé Ouédraogo (Burkina Faso)
Ángela Parrado Rosselli (Colombie)
Josoa Randriamalala (Madagascar)
Frack Richard (France)
Cécile Richard-Hansen (France)
Er-Riyahi Saber (Maroc)
Jolien Schure (Suède)
Jose Antonio Sierra-Huelsz (Mexique)
Marie Laure Sougoti-Guissou (Burkina Faso)
Shinya Takeda (Japon)
Marie-France Thévenon-Brillard (France)
Irié Casimir Zo-Bi (Côte d'Ivoire)

Graphiste

Jean-Jacques Gonod

Correcteur

Jacques Bodichon

Traductrices

Ilona Bossanyi
Anna Lon Quintana

Service de presse

Laurence Campas

Webmestre

Jean-François Trébuchon

Directrice de publication

Élisabeth Claverie de Saint Martin



Relecteurs ayant contribué à l'évaluation des articles en 2020/

Reviewers who have contributed to the evaluation of articles in 2020

Abderrahman Aafi, Amah Akodewou, Achille Assogbadjo, Seheno Andriantsaralaza, Jacques Beauchêne, Julie Betbeder, Lilain Blanc, Élodie Blanchard, Évelyne Bocquet, Frans Bongers, Clément Bourgoïn, Kévin Candelier, Stéphanie Carrière, François Courbet, Kasso Dainou, André De Kesel, Philippe Deleporte, Sékouna Diatta, Chauvelin Douh, Isabelle Droy, Fulvio Ducci, Simon Dufour, Sylvie Durrieu, Jean Paul Obame Engone, Mohamed Tahar Elayeb, Adeline Fayolle, Édith Fernandez-Baca, Éric Forni, Antoine Galiana, Laurent Gazull, Nancy Gélinas, Jean Gérard, Gus Gintzburger, Valéry Gond, Mostefa Goubi, Sylvie Gourlet-Fleury, Gérard Nounagnon Gouwakinnou, Michel Grimaldi, Hubert Guérin, Masumi Hasegawa, Jean-Marc Hémin, Dominique Hervé, Aristide Comlan Houngan, Justin Kassi, Dalila Kherchouche, Kouami Kokou, Adzo Kokutse, Bruno Kpangui, Davor Kržišnik, Clément Lacoste, Anne Larson, Nassima Lassouane, Nicolas Le-Moigne, Renan Leroux, Gauthier Ligot, Florent Lombard, Jean Joël Loumeto, Dominique Louppe, Daniel Maillard, Bernard Mallet, Rémy Marchal, Jean-François Mas, Radim Matula, Lucas Jose Mazzei de Freitas, Audrey Mercier, Éric André Nicolini, Pius Tshimankinda Mpiana, Johan Oszwald, Ahmed Ouhammou, Christine Ouinsavi, Amadé Ouédraogo, Angela Parrado-Rosselli, Marko Petrič, Romain Pirard, Noémie Pousse, Khellaf Rabhi, Josoa Randriamalala, Jacques Ranger, Dimitrios Raptis, Cécile Richard-Hansen, Emilio de los Ríos Ibarra, Patrick Rousset, Er-riyahi Saber, Slim Saïdi, Julian Schlubach, Julien Schure, Jose Antonio Sierra-Huelsz, Juan Carlos Suarez, Marijenka Tabaković, Jacques Tassin, Adeline Thévand, Marie-France Thévenon, Bernard Thibaut, Fanta Tietiambou, Ismaïla Toko Imourou, Toma Tonchev, Jean-François Trébuchon, Astrid Verhegghen, Cédric Vermeulen, Matthieu Vignal, Irié Casimir Zo-Bi

Accès gratuit aux articles
en **version électronique** sur la plateforme
de publication Revela du Cirad :

revues.cirad.fr

© Bois et forêts des tropiques © Cirad

ISSN 0006-579X

Dépôt légal : septembre 2021

283997X - Imprimé en France par Dupli-Print

733, rue Saint-Léonard

53100 Mayenne, France

Maquette : J.-J. Gonod, Montpellier

Numéro d'inscription à la CPPP : 59465

Directrice gérante : É. Claverie de Saint Martin

Version papier abonnement annuel

de 4 numéros :

France : **240 €/an ttc**

Autres pays de l'Union européenne : **240 €/an ht**

Pays hors Union européenne : **260 €/an ht**

Abonnements et commandes de numéros

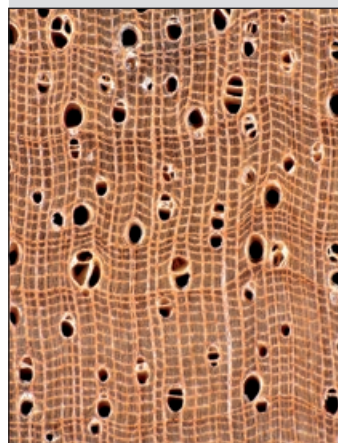
Cirad - Bois et forêts des tropiques
Campus international de Baillarguet
TA C-DIR/B

34398 Montpellier Cedex 5, France

Tél. : +33 4 67 59 37 81

Télécopie : +33 4 67 59 37 55

Site web : <http://revues.cirad.fr/index.php/bft>



Observation microscopique
d'une section transversale de bois
de *Couratari multiflora* (Sm.) Eyma,
Amérique du Sud tropicale.
*Microscopic view of a cross section
of Couratari multiflora wood (Sm.) Eyma,
tropical South America.*
Photo J.-C. Cerre.



Conditions de publication

Consulter les instructions aux auteurs qui figurent
sur le site web :

<http://revues.cirad.fr/index.php/bft>

Pour être recevables, les textes doivent être
originaux. Tous les articles sont soumis à
l'appréciation d'un comité éditorial. Après
acceptation, des corrections ou modifications
sont proposées aux auteurs.

Les opinions émises par les auteurs n'engagent
pas la responsabilité de la rédaction.



Politique d'Accès Libre Open Access policy

La revue est en Accès Libre gratuit sans frais de
publication et sans frais de lecture sur le site web. Il n'y
a pas d'embargo, les articles sont accessibles sur le site
web immédiatement après publication. Tous les frais
de publication et d'évaluation sont pris en charge par la
revue. Seul le tirage papier est payant avec un abonnement
annuel, sans obligation pour la publication de l'article.
Les articles sont régis en France par le droit d'auteur avec
une cession de droits. L'auteur a la paternité du contenu
et cède seulement ses droits pour la fabrication et la
diffusion électronique et imprimée de l'article. L'auteur
est libre de diffuser l'article dont il est auteur autant qu'il
le souhaite et sans réserve, sans le modifier. L'auteur est
libre de déposer l'article dans les archives publiques et
sur les sites web de son institution de recherche.
Les articles sont régis à l'international par les licences
Creative Commons.



La licence utilisée est

Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

Cette licence autorise la redistribution, à des fins
commerciales ou non, tant que l'œuvre est diffusée sans
modification et dans son intégralité, avec attribution et
citation du nom des auteurs selon le souhait de la revue.
L'auteur est autorisé à partager, copier, distribuer et
communiquer le matériel par tous moyens et sous tous
formats pour toute utilisation, y compris commerciale.
L'offrant ne peut retirer les autorisations concédées par la
licence tant que vous appliquez les termes de cette licence.
Les utilisateurs doivent créditer l'Œuvre, intégrer un lien
vers la licence et indiquer si des modifications ont été
effectuées à l'Œuvre.

L'utilisation d'une licence *creative commons* ne se
substitue pas au Droit d'auteur et au *copyright*.

ÉDITORIAL

- Bois et Forêts des Tropiques contribue à la médiation scientifique pour accompagner les changements indispensables de la société** 3
 K. CANDELIER, J.-F. TRÉBUCHON

LE POINT SUR...

- Variations des caractéristiques physiques et mécaniques du bois de *Balanites aegyptiaca* en fonction de trois provenances** 5
 D. DOUGABKA, J. GÉRARD, T. BIANZEUBE, M. DENDONCKER, C. VINCKE, R. MARCHAL, D. GUIBAL, A. GUYOT
- Contribution à l'étude des paramètres dendrométriques et à la cartographie des peuplements relictuels d'une espèce septentrionale rare au Maroc : *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.** 21
 H. ENNOUNI, A. SAHLI, M. ATER
- Application de la méthode *BDq* dans les écosystèmes tropicaux à forêt mixte complexe au Nigeria** 37
 F. N. OGANNA, J. J. GORGOSO-VARELA, A. O. ONEFELI
- Impacts des types d'occupation des terres sur l'essence *Boswellia dalzielii* Hutch., arbre à encens africain au Burkina Faso** 51
 P. SABO, A. OUEÛRAOGO, D. S. J. C. GBEMAVO, K. V. SALAKO, R. GLÈLÈ KAKAÏ
- Enjeux et amélioration de la gestion des espèces du genre *Entandrophragma*, arbres africains devenus vulnérables** 65
 E. KASONGO YAKUSU, D. LOUPPE, K. F. MONTHE, O. J. HARDY, F. BOLA MBELE LOKANDA, W. HUBAU, J. VAN DEN BULCKE, J. VAN ACKER, H. BEECKMAN, N. BOURLAND
- Accompagner la découverte scientifique des arbres par de jeunes élèves (Creil, France)** 85
 K. CANDELIER, P. MOUELLE, A. OCANA, M. BATTEUX, É. MANZANARES, P. CLAIR, A. ANSOUR

DESCRIPTIF TECHNIQUE

- Descriptif technique d'essence tropicale – Idéwa** 95
Descriptif technique d'essence tropicale – Tauari 101

RÉSUMÉ DE THÈSE

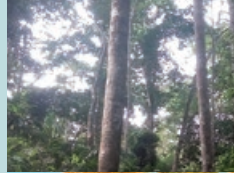
- Planification systématique de la conservation basée sur les contraintes, une approche générique et expressive : application à l'aide à la décision pour la conservation des forêts de Nouvelle-Calédonie** 107
 D. JUSTEAU-ALLAIRE

VOS LECTURES

- 20 – 36 – 64
Aires protégées d'Afrique centrale – État 2020. 110
 DOUMENGE C., PALLA F., ITSOUA MADZOUS G.-L. (Éds Sc.), OFAC-COMIFAC ET UICN.

CONFÉRENCES INTERNATIONALES

- 5^e congrès mondial d'Agroforesterie, 17-20 juillet 2022, Québec, Canada.** 109





EDITORIAL

- Bois et Forêts des Tropiques contributes to scientific mediation to accompany the necessary changes in society** 3
K. CANDELIER, J.-F. TRÉBUCHON

FOCUS ON...

- Variations in the physical and mechanical properties of *Balanites aegyptiaca* wood from three provenances** 5
D. DOUGABKA, J. GÉRARD, T. BIANZEUBE, M. DENDONCKER, C. VINCKE, R. MARCHAL, D. GUIBAL, A. GUYOT
- Contribution to studies on dendrometric parameters and mapping of relict stands of *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn., a northern species rarely found in Morocco** 21
H. ENNOUNI, A. SAHLI, M. ATER
- Application of the *BDq* method to complex tropical mixed forest ecosystems in Nigeria** 37
F. N. OGAN, J. J. GORGOSO-VARELA, A. O. ONEFELI
- Land use impacts on *Boswellia dalzielii* Hutch., an African frankincense tree in Burkina Faso** 51
P. SABO, A. OUÉDRAOGO, D. S. J. C. GBEMAVO, K. V. SALAKO, R. GLÈLÈ KAKAÏ
- Improved management of species of the African *Entandrophragma* genus, now listed as vulnerable** 65
E. KASONGO YAKUSU, D. LOUPPE, K. F. MONTHÉ, O. J. HARDY, F. BOLA MBELE LOKANDA, W. HUBAU, J. VAN DEN BULCKE, J. VAN ACKER, H. BEECKMAN, N. BOURLAND
- Scientists helping schoolchildren to learn about trees (Creil, France)** 85
K. CANDELIER, P. MOUELLE, A. OCANA, M. BATTEUX, É. MANZANARES, P. CLAIR, A. ANSOUR

TECHNICAL DESCRIPTION

- Technical description of tropical species. Idéwa.** 95
Technical description of tropical species. Tauari. 101

PHILOSOPHIÆ DOCTOR ABSTRACT

- Constraint-based systematic conservation planning: a generic and expressive approach applied to decision support for the conservation of New Caledonian forests** 107
D. JUSTEAU-ALLAIRE

BOOK REVIEW

- 20 – 36 – 64
Central African protected areas – Status 2020. 110
DOUMENGE C., PALLA F., ITSOUA MADZOUS G.-L. (Eds Sc.), OFAC-COMIFAC & UICN.

INTERNATIONAL CONFERENCES

- The 5th World Congress on Agroforestry, July 17-20, 2022, in Québec City, Canada.** 109

Bois et Forêts des Tropiques contribue à la médiation scientifique pour accompagner les changements indispensables de la société

Les connaissances et les savoirs sont essentiels pour faire évoluer les sociétés. Ils constituent un élément-clé pour mieux cerner le monde qui nous entoure et mieux comprendre les changements et les défis auxquels nous devons faire face. Le métier de chercheur consiste à exploiter ce gisement intarissable représenté par l'inconnu. Les chercheurs apportent au grand public cette ressource en la modelant de façon à la rendre accessible aux diverses strates de la société. Malgré la multitude de formes imaginées pour interagir, il s'avère que ces dialogues peinent encore à tisser les liens solidaires indispensables entre les différentes parties prenantes pour transformer ensemble le monde. Les citoyens se sentent bien souvent exclus et les scientifiques ont le sentiment de ne pas toujours être bien entendus.

La communication ou médiation scientifique, notamment celle liée aux sciences du bois, sciences forestières et sciences de l'environnement, doit aujourd'hui amener à considérer tout public en tant qu'acteur essentiel, en l'invitant à participer aux réflexions scientifiques. Cette ouverture vers le grand public aidera à mieux le préparer aux évolutions de son environnement scientifique tout en développant une pensée critique et rationnelle. Cela amènera tous les citoyens à participer de manière responsable aux grands enjeux sociétaux et environnementaux. C'est donc en introduisant la science dans la société, et vice versa, que les évolutions scientifiques et sociétales seront mieux acceptées. Le travail des chercheurs ne se résume pas à la publication de leurs expériences et de leurs résultats dans des articles ou tout autre support destiné et réservé uniquement aux univers académiques et scientifiques. Ce travail de partage de connaissances et savoirs attire le chercheur bien au-delà de cette sphère d'évaluation et de publication nécessaire à la profession. Les chercheurs trouvent des occasions et des solutions pour familiariser le grand public à la démarche scientifique.

C'est dans cette perspective que *Bois et Forêts des Tropiques* s'associe à cette démarche de médiation scientifique et de diffusion des savoirs au sein de la société et vers le grand public. Cette action se traduit par la mise en avant de quelques exemples de l'implication de chercheurs des sciences du bois et des sciences forestières. Il est essentiel que le grand public prenne connaissance du fonctionnement des forêts, de leur utilité pour l'environnement, ainsi que des multiples services qu'elles rendent à l'humanité. Pour mieux comprendre tous ces phénomènes observés et les méthodes scientifiques employées, le citoyen a besoin de pratiquer l'expérimentation par une mise en situation. Il s'impliquera ainsi plus facilement dans des réflexions collectives relatives aux grands enjeux planétaires et locaux, pour lesquels chacun d'entre nous joue un rôle, qu'il s'agisse de la conservation de la biodiversité, de la protection et de la valorisation des forêts, ou de l'atténuation du changement climatique.



Identification et reconnaissance des principales essences d'arbres présentes dans les forêts françaises. Atelier mené en classe et encadré par un guide « nature et patrimoine » et un chercheur en sciences du bois, en partenariat avec le dispositif « Savanturiers – École de la Recherche ». Photo K. Candelier.

Cet engagement sociétal se manifeste par exemple lorsqu'un chercheur intervient auprès d'un jeune public, en accompagnant des enfants à découvrir la démarche scientifique et les postures adoptées dans son travail. C'est ce que nous rapporte l'expérience menée par Candelier *et al.*, en partenariat avec le dispositif « Savanturiers – École de la Recherche », publié dans ce numéro de *Bois et Forêts des Tropiques*. À cette occasion, les auteurs nous décrivent la fraîcheur du candide face à l'inconnu et les nouveaux savoirs qu'il tente de faire émerger et d'intégrer avec méthode et rigueur, encadrés par un chercheur. Ce qu'ils nous disent, c'est que cet échange entre la sphère scientifique et la société doit s'adosser aux principes d'une éducation aux sciences et à la démarche scientifique, à un accès équitable à la connaissance, mais aussi, et surtout, à l'incontournable entrelacement collaboratif des différents



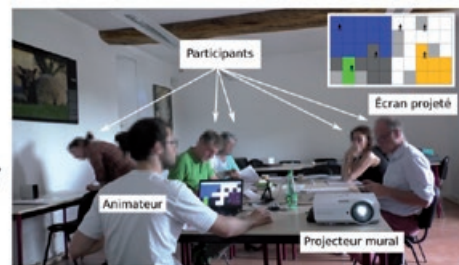
Exposition photographique itinérante « L'avenir des forêts est entre vos mains ! » (Rossi V., Lescuyer G., 2021).

Photos Collectif de recherche Forêts et Sociétés, Cirad.

acteurs en quête de savoirs. Dans ce cas, le chercheur et l'enseignant inscrivent l'élève dans une démarche de pédagogie collaborative tout en le rendant acteur de son auto-apprentissage. Elle déclenche chez l'apprenant les mécanismes pour observer, expérimenter, exposer son jugement et le discuter à travers des jeux, des mises en scène, des ateliers, et via des expériences sensorielles, sociologiques, écologiques.

Les possibilités de transmission de savoirs vers la société sont sans limites et parfois même imperceptibles. Elles peuvent apparaître dans des festivals, des expositions, des ateliers pédagogiques, des randonnées nature, dans la presse quotidienne, dans des films, des livres, les bandes dessinées, etc. Les chercheurs sont libres de faire jouer leur imagination et d'utiliser à loisir les médias afin de mieux se connecter avec le citoyen. Cette médiation peut prendre la forme d'une exposition itinérante sur la manière de préserver et de valoriser les forêts d'Afrique centrale, telle qu'organisée par Rossi et Lescuyer (2021), ou un livre adressé au grand public sur les pistes possibles de préservation et de valorisation des forêts tropicales, tel *Vivre avec les forêts tropicales* rédigé et illustré par le collectif de recherche Forêts et Sociétés (Sist *et al.*, 2021), ou encore un jeu de rôle comme *Foster forest* (Fouqueray, 2019 et 2020) pour adapter les pratiques professionnelles de la foresterie afin de faire face aux changements climatiques, produit émergent du parcours d'un doctorant encadré par une équipe de chercheurs. L'énumération serait longue tant elle est foisonnante. Les scientifiques encouragent les différentes strates de la société à s'appropriier les savoirs et les connaissances qui les amèneront à prendre des décisions individuelles et collectives éclairées. Par le canal médiatique de *Bois et Forêts des Tropiques*, ils promeuvent les produits de la recherche autrement que les articles qui y sont publiés traditionnellement. C'est pourquoi paraissent dans les pages de cette revue scientifique et technique des résumés de thèse et des descriptifs techniques. Dans l'avenir, les chercheurs pourront occasionnellement s'y exprimer sous d'autres formes encore, comme l'ont proposé Candelier *et al.* (2021). Ces efforts de médiation aident à réagir face aux petits et grands défis qui tapissent les paysages de l'environnement dans lesquels nous évoluons tous, tels que les grands changements sociétaux liés à la démographie, le partage des ressources et savoirs, les changements des climats, pour ne citer que ceux-là. L'exposé de ces quelques exemples d'entrelacement sociétal témoignent donc de l'implication quotidienne de la recherche dans la société, et vice versa.

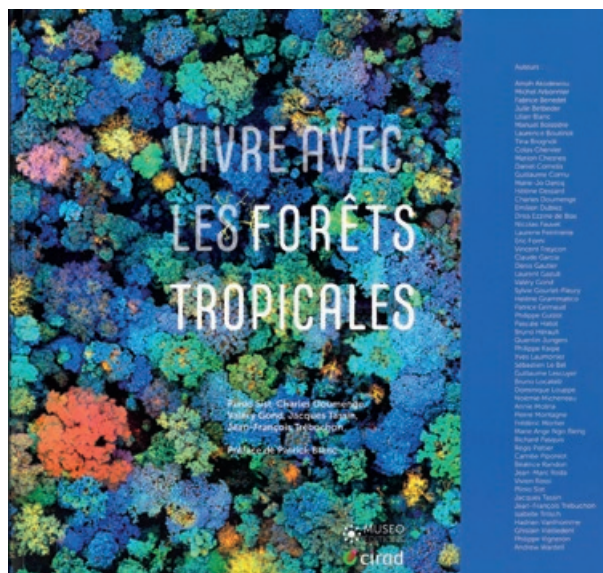
Kévin CANDELIER, Jean-François TRÉBUCHON
Membres de l'équipe éditoriale de la revue
Bois et Forêts des Tropiques



Foster Forest, jeu sérieux de simulation participative pour l'adaptation aux changements climatiques des forestiers. Cet atelier ludique permet à des forestiers publics, des propriétaires privés, des experts forestiers et des gestionnaires d'espaces naturels de tester ou d'imaginer des modes d'adaptation aux dérèglements climatiques en forêt (Fouqueray, 2020).
Photo F. Fouqueray.

Références

- Candelier K., Mouelle P., Ocana A., Batteux M., Manzanares E., Clair P., Ansour A., 2021. Accompagner la découverte scientifique des arbres par de jeunes élèves (Creil, France). *Bois et Forêts des Tropiques*, 349 : 85-94. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2021.349.a36792>
- Fouqueray T., 2019. Adaptations aux incertitudes climatiques de long terme : trajectoires socio-écologiques de la gestion forestière française. Thèse de doctorat, Université de Paris-Saclay, 295 p.
- Fouqueray T., 2020. *Foster forest*. Jeu de rôle sérieux de simulation prospective. <http://www.fosterforest.fr/>
- Sist P., Doumenge C., Gond V., Tassin J., Trébuchon J.-F. (eds), *et al.*, 2021. *Vivre avec les forêts tropicales*. Éditions MUSEO, 216 p.
- Rossi V., Lescuyer G., 2021. L'avenir des forêts est entre vos mains ! Cirad, exposition photographique itinérante.



Couverture du livre *Vivre avec les forêts tropicales*, conçu et rédigé par un collectif de chercheurs. Le livre est à rebours des idées reçues, sans jargon ni condescendance pour mieux s'adresser au grand public francophone. Il rend compte des imbrications respectives entre les humains et les forêts tropicales (Sist *et al.*, 2021).

Photo Éditions MUSEO.

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 BIANZEUBE³
Morgane DENDONCKER⁴
Caroline VINCKE⁴
Rémy MARCHAL⁵
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 –
dougabkado@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 : 1^{er} avril 2021 ; date de publication : 1^{er} 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>

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. Quarante-trois 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 sahéliana y sudanesa chadianas y de la zona sahéliana 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 appli-

cations 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

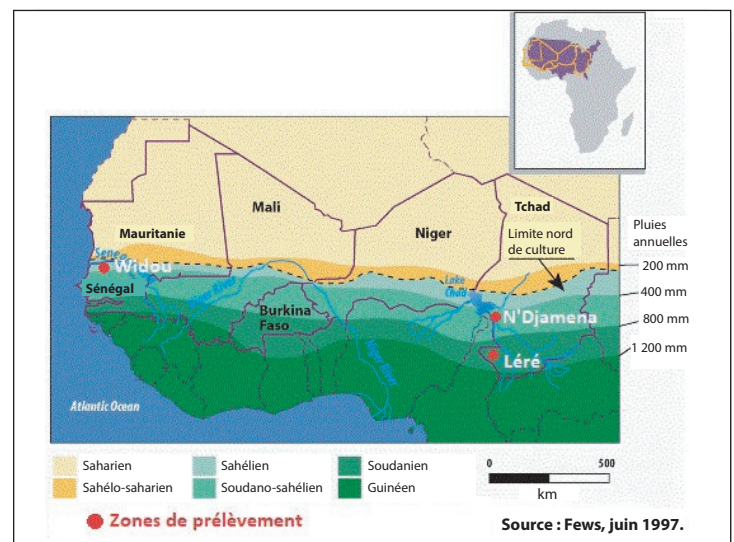


Figure 1.
Zones d'étude.
Study areas.

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 Thien-goly 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 %) ;

- 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 (Gubal *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.



Photo 3.
 Billons prélevés après abattage.
Bucked wooden log after felling.
 Photo D. Dougabka.

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.

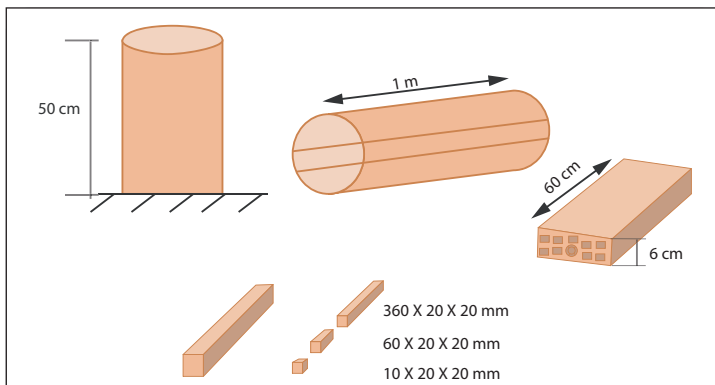


Figure 2.
 Processus d'obtention des éprouvettes.
The process of obtaining the specimens.



Photo 4.
Balance Sartorius.
Sartorius scale device.
Photo D. Dougabka.

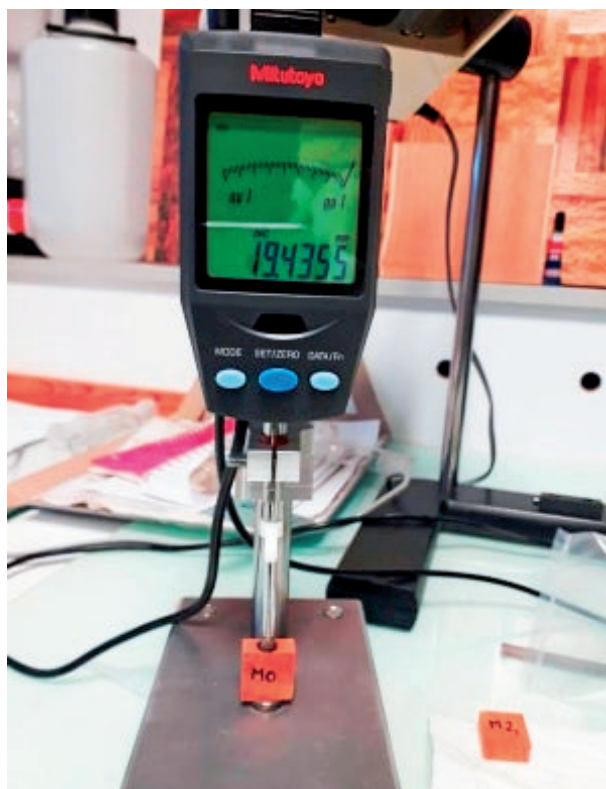


Photo 5.
Comparateur Mitutoyo.
Mitutoyo dial gauge.
Photo D. Dougabka.

Infradensité

L'infradensité « d » d'un échantillon est le rapport entre sa masse anhydre M_a et son volume saturé V_s . 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) :

$$R_{T,R} = \frac{e_s - e_0}{e_s} \times 100 \quad (\text{équation 2})$$

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_0 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 tangential 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 tangential ($R_R + R_T$) constitue une bonne approximation du retrait volumique.

$$R_B = \frac{V_s - V_a}{V_s} \times 100 \approx R_R + R_T \quad (\text{équation 3})$$

avec V_s = volume saturé et V_a = volume anhydre.

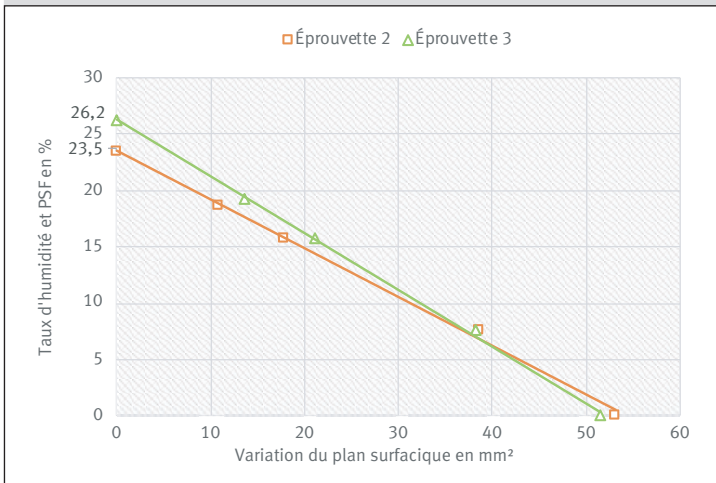


Figure 3.

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, m²/s²), 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 Fourier rapide (photo 6).

Les mesures ont été réalisées sur des éprouvettes de 360 x 20 x 20 mm³ 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).

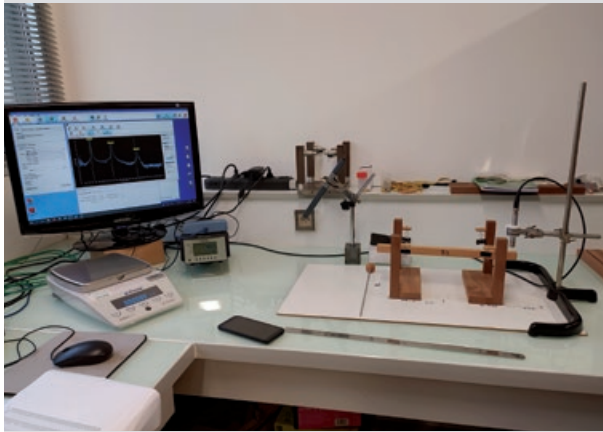


Photo 6.
 Dispositif du test BING©.
 BING © test device.
 Photo D. Dougabka.



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 mm³, 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 (mm²).

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 mm³ 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).

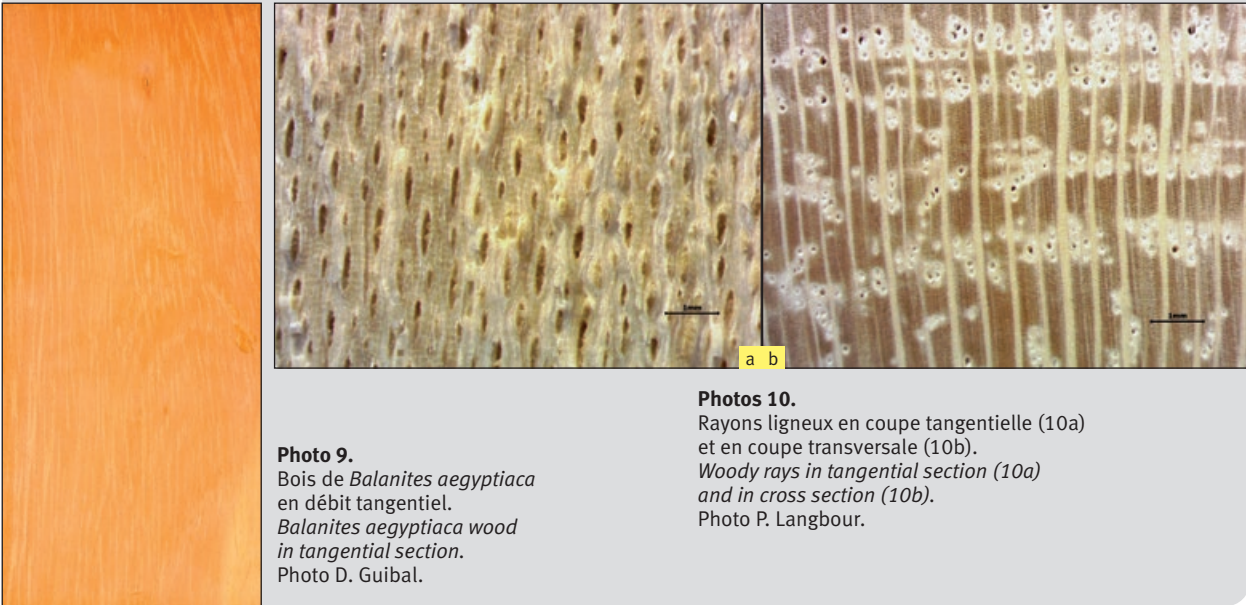


Photo 9.
 Bois de *Balanites aegyptiaca*
 en débit tangentiel.
Balanites aegyptiaca wood
 in tangential section.
 Photo D. Guibal.

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 écaillée, 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/m ³)	Mv (kg/m ³)	C ₁₂ (MPa)	F ₁₂ (MPa)	E ₁₂ (MPa)	MS (Mm ² /s ²)
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 % ; C₁₂ : contrainte de rupture en compression longitudinale à 12 % d'humidité ; F₁₂ : contrainte de rupture en flexion statique à 12 % d'humidité ; E₁₂ : module d'élasticité longitudinal à 12 % d'humidité ; MS : module spécifique (= E₁₂ / 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 4i) 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).

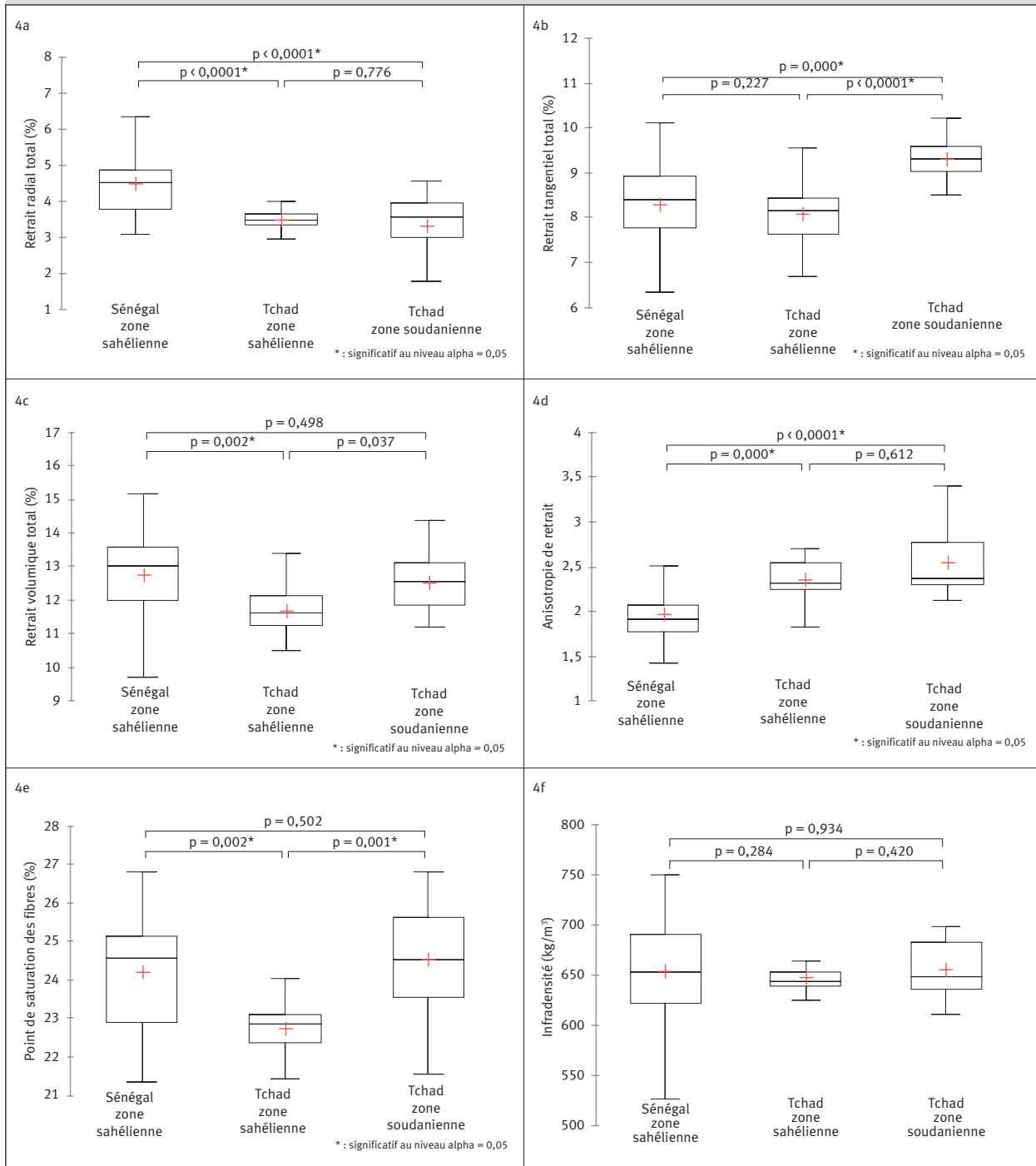
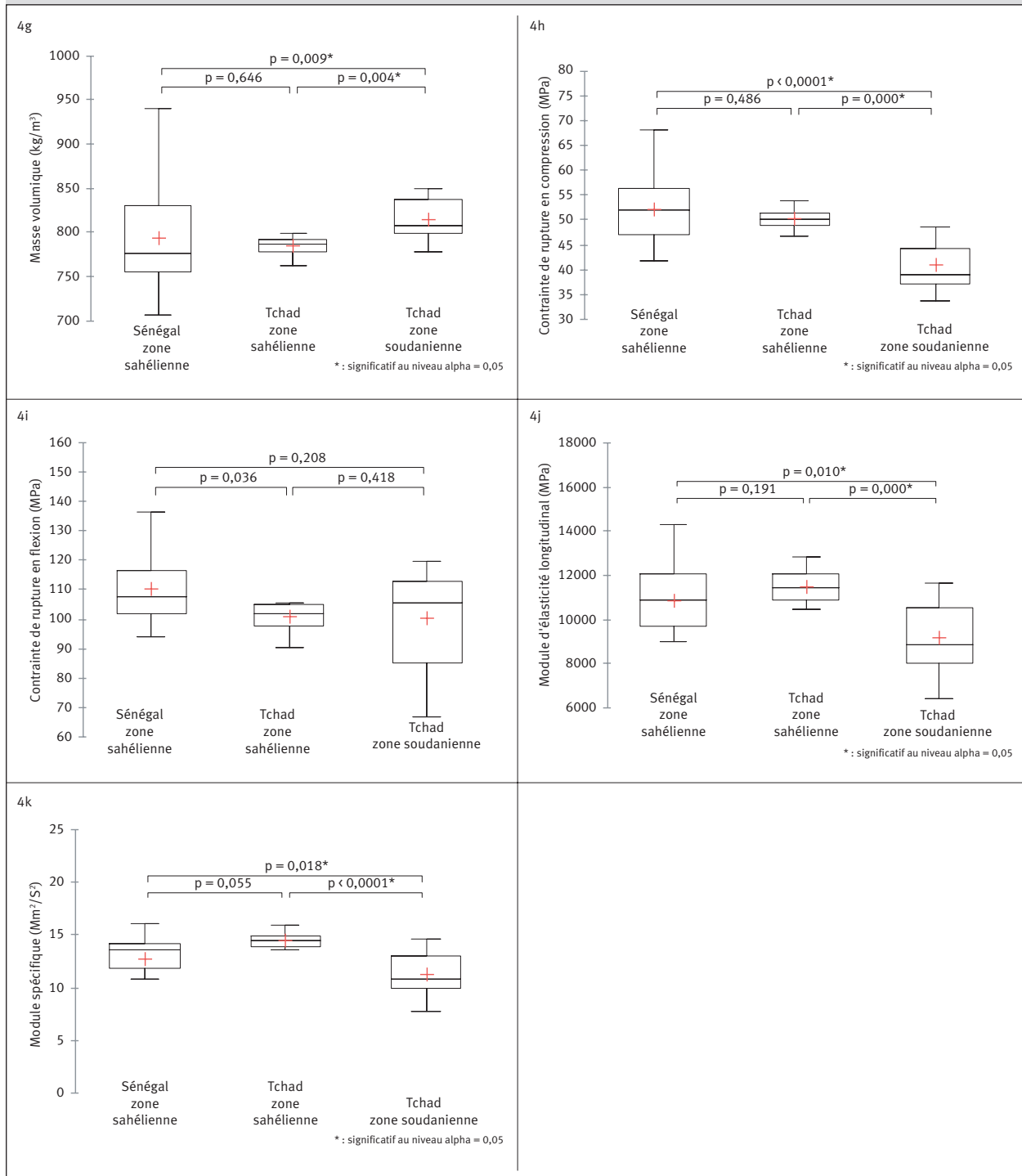


Figure 4.

Distributions des propriétés du bois de *Balanites aegyptiaca* en fonction de la provenance. 4.a. Comparaison du retrait radial total pour les trois provenances. 4.b. Comparaison du retrait tangentiel total pour les trois provenances. 4.c. Comparaison du retrait volumique total pour les trois provenances. 4.d. Comparaison de l'anisotropie de retrait pour les trois provenances. 4.e. Comparaison du point de saturation des fibres pour les trois provenances. 4.f. 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. 4.b. Comparison of total tangential shrinkage for the three provenances. 4.c. Comparison of total volumetric shrinkage for the three provenances. 4.d. Comparison of shrinkage anisotropy for the three provenances. 4.e. Comparison of fibre saturation point for the three provenances. 4.f. Comparison of infradensity for the three provenances.

**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 sahélienne 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 der-

nières 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/m ³)	799	793	780	627,2
Module d'élasticité longitudinal (MPa)	10 337	10 897	8 813	
Module spécifique (Mm ² /s ²)	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. aegyptiaca* 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, 26^e 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 aegyptiaca*. 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](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-dae4-4284-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.journalcjust.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



TASSIN J., 2020. **POUR UNE ÉCOLOGIE DU SENSIBLE**. FRANCE, ÉDITIONS ODILE JACOB, 208 P.

Alors que la biodiversité s'étirole sous l'effet du réchauffement climatique et des pratiques agricoles intensives, la science offre comme remède une écologie impuissante à rétablir le contact entre l'Homme et la Nature. Héritée des Lumières et d'une vision pleinement rationaliste des choses, aurait-elle oublié en chemin que la Nature n'est pas un objet de science, mais un prolongement de nous-mêmes qui ne se laisse pas mettre en équations ? Empreinte de cette vision mécaniste du vivant, l'écologie scientifique ignore trop souvent la dimension humaine et sensible de notre rapport à la Nature. C'est à fonder une écologie différente qu'incite ce livre. Plutôt que des grands concepts, des calculs et des simulations complexes, il faut désormais penser comme un tout indissoluble le vivant et son environnement, afin de retrouver le plaisir tout simple du contact direct avec la plante et l'animal, cette proximité essentielle dont tout le reste découlera. Cette écologie du sensible, et non de la seule raison, est peut-être la clé de notre survie. Jacques Tassin est chercheur en écologie végétale au Cirad (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement). Il est l'auteur de *À quoi pensent les plantes ?* et *Penser comme un arbre*.
Résumé adapté de celui de l'éditeur.

Éditions Odile Jacob, 15, rue Soufflot, 75240 Paris Cedex 05, France.
<https://www.odilejacob.fr/>



GRANIER A., 2021. **LES ARBRES GRANDISSENT-ILS TOUTE LEUR VIE ?** FRANCE, ÉDITIONS QUÆ, 152 P.

Les arbres sont présents partout sur notre planète, excepté au cœur des déserts et dans les zones subpolaires. Indispensable ressource économique, mais aussi repère familier de nos paysages, l'arbre incarne de multiples symboles dans notre société, et son capital sympathie ne cesse de croître au fil des découvertes scientifiques. Pouvant abriter des centaines d'espèces, champignons, insectes, oiseaux ou encore mammifères, l'arbre est à lui seul un véritable écosystème. À l'échelle de la planète, les forêts régulent le cycle de l'eau, atténuent les extrêmes climatiques et stockent du carbone. Mais arbres et forêts sont à la fois puissants et fragiles, à la merci de catastrophes, de ravageurs ou de destructions volontaires. Comment l'arbre produit-il sa propre nourriture ? De quelles adaptations est-il capable pour survivre au gel ou à la sécheresse ? De quelles réserves dispose-t-il pour sa croissance ? Quelles stratégies sa reproduction met-elle en œuvre ? Comment la sève brute peut-elle monter jusqu'à la cime, parfois à plus de 100 m de haut ? Les arbres pluricentennaires sont-ils vraiment encore vivants ? Certaines espèces risquent-elles de disparaître avec le changement climatique ? À travers 60 questions-réponses illustrées de nombreuses photos et de schémas pédagogiques, ce livre présente les forces et les faiblesses ainsi que les propriétés étonnantes des arbres, organismes complexes et encore méconnus.
Résumé adapté de celui de l'éditeur.

Éditions Quæ, c/o INRAE, RD 10, 78026 Versailles Cedex, France.
www.quae.com



FAUVERGUE X., RUSCH A., BARRET M., BARDIN M., JACQUIN-JOLY E., MALAUSA T., LANNOU C., 2020. **BIOCONTRÔLE : ÉLÉMENTS POUR UNE PROTECTION AGROÉCOLOGIQUE DES CULTURES**. FRANCE, ÉDITIONS QUÆ, 376 P.

Protéger les cultures par des moyens naturels est une nécessité pour la transition vers une agriculture respectueuse de l'environnement. Un effort de recherche et développement sans précédent est aujourd'hui mis en œuvre dans le domaine du biocontrôle, qui rassemble des approches basées sur l'usage d'organismes vivants et de produits d'origine biologique. Cet ouvrage en présente un panorama exhaustif et en explique les fondements théoriques et les applications pratiques. L'histoire du biocontrôle débute à la fin du XIX^e siècle avec les premiers travaux sur la lutte biologique, qui utilise les ennemis naturels des insectes nuisibles. Puis les progrès scientifiques en écologie, en génomique, en modélisation, vont étendre les possibilités. On cherche maintenant à reconstruire des équilibres biologiques à l'échelle des paysages cultivés. En manipulant leur sens olfactif, on attire les insectes dans un piège, ou on brouille la piste qui les conduit au partenaire sexuel. En étudiant le microbiote végétal, on espère améliorer la santé des plantes. On découvre également que certaines molécules synthétisées par des microorganismes ou par des végétaux sont utilisables en biocontrôle. Réalisée par des chercheurs de réputation internationale, cette synthèse très complète s'adresse à un public professionnel, mais aussi à tout lecteur désireux de s'informer sur la révolution agroécologique de l'agriculture.
Résumé adapté de celui de l'éditeur.

Éditions Quæ, c/o INRAE, RD 10, 78026 Versailles Cedex, France.
www.quae.com

Contribution à l'étude des paramètres dendrométriques et à la cartographie des peuplements relictuels d'une espèce septentrionale rare au Maroc : *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.



Photo 1.

Beau spécimen d'*Alnus glutinosa* dans un cours d'eau d'altitude, Oued Ketama dans la cédraie d'Ikaouen non loin de Tlata Ketama (Rif central).
Beautiful specimen of *Alnus glutinosa* in a high altitude stream, Oued Ketama in the cedar forest of Ikaouen not far from Tlata Ketama (central Rif).
Photo M. Ater.

Hassan ENNOUNI¹
Abdelouahab SAHLI¹
Mohammed ATER¹

¹ Université Abdelmalek-Essaâdi
Faculté des sciences
Département de biologie
Laboratoire de botanique appliquée
Équipe Bio-Agrodiversité
BP 2062
93030 Tétouan
Maroc

Auteur correspondant /
Corresponding author:
Mohammed ATER – m.ater@uae.ac.ma

Doi : 10.19182/bft2021.349.a36777 – Droit d'auteur © 2021, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 3 décembre 2020 ; date d'acceptation : 30 avril 2021 ; date de publication : 1^{er} septembre 2021.



Licence Creative Commons :
Attribution - 4.0 International.
Attribution-4.0 International (CC BY 4.0)

Citer l'article / To cite the article

Ennoui H., Sahli A., Ater M., 2021. Contribution à l'étude des paramètres dendrométriques et à la cartographie des peuplements relictuels d'une espèce septentrionale rare au Maroc : *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. Bois et Forêts des Tropiques, 349 : 21-35. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2021.349.a36777>

RÉSUMÉ

Contribution à l'étude des paramètres dendrométriques et à la cartographie des peuplements relictuels d'une espèce septentrionale rare au Maroc : *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.

Alnus glutinosa (L.) Gaertn. (Betulaceae) est une espèce clé dans certaines formations alluviales et riveraines du continent européen. Au Maroc, elle se trouve en limite méridionale de son aire de distribution où elle est représentée par des formations relictuelles dans les zones refuges où elle a migré pendant les phases glaciaires du Pléistocène. Malgré sa grande valeur patrimoniale, il y a très peu de données sur son aire de répartition et l'état des peuplements. Ce travail a permis de localiser et cartographier les principaux peuplements dans la zone d'occurrence de cette espèce dans le Rif au nord du Maroc. La typologie des peuplements a été réalisée dans douze sites de référence en déterminant leurs principales caractéristiques telles que la nature du régime forestier, la composition, la taille, le recouvrement et la densité. Les caractéristiques dendrométriques ont permis de renseigner la structure et la dynamique des peuplements. Les résultats obtenus constituent un apport important de données quantitatives géoréférencées sur la répartition actuelle et la dynamique des peuplements d'*A. glutinosa* au Maroc. Étant donné l'état de conservation des peuplements, la dégradation de l'habitat et la faible régénération, cette espèce peut être considérée comme menacée et doit bénéficier de mesures urgentes de protection.

Mots-clés : aulne glutineux, *Alnus glutinosa*, limite d'aire, ripisylve, cartographie, dendrométrie, conservation, Rif centro-occidental, Maroc.

ABSTRACT

Contribution to studies on dendrometric parameters and mapping of relict stands of *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn., a northern species rarely found in Morocco

The common alder, *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. (Betulaceae), is a key species in certain alluvial and riparian formations in continental Europe. The alders found in Morocco are at the southernmost boundary of their range and represented there by relict formations in refuge zones to which the species had migrated during the glacial phases of the Pleistocene. Despite its heritage value, there are very few data on its range of distribution or the condition of its populations. This study aimed to locate and map the main forest stands where this species occurs in the Rif region of northern Morocco. A typology of the stands was produced from surveys of twelve reference sites by determining their main characteristics, including stand composition, size, coverage, density and the nature of the forest regime. Stand structure and dynamics were determined from these dendrometric characteristics. The results contribute important quantitative and georeferenced data on the current distribution and dynamics of *A. glutinosa* populations in Morocco. Given their poor state of conservation, their degraded habitats and low regeneration rate, this species should be considered as endangered and urgently in need of protective measures.

Keywords: common alder, *Alnus glutinosa*, range boundary, riparian forest, mapping, dendrometrics, conservation, Central-Western Rif, Morocco.

RESUMEN

Contribución al estudio de los parámetros dendrométricos y a la cartografía de los relictos de una especie rara del norte de Marruecos: *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.

Alnus glutinosa (L.) Gaertn. (Betulaceae) es una especie clave en algunas formaciones aluviales y ribereñas del continente europeo. En Marruecos se encuentra en el límite sur de su área de distribución, donde está representada por formaciones relictas en las zonas de refugio a las que migró durante las fases glaciares del Pleistoceno. A pesar de su alto valor patrimonial, existen muy pocos datos sobre su área de distribución y el estado de conservación de la masa forestal. Este trabajo ha permitido localizar y cartografiar las principales masas forestales en la zona donde se encuentra esta especie en el Rif, en el norte de Marruecos. La tipología de las poblaciones se llevó a cabo en doce lugares de referencia determinando sus principales características, como la naturaleza del régimen forestal, la composición, el tamaño, la cobertura y la densidad. Las características dendrométricas proporcionaron información sobre la estructura y la dinámica de las masas. Los resultados obtenidos constituyen una importante aportación de datos cuantitativos georreferenciados sobre la distribución y la dinámica actuales de las poblaciones de *A. glutinosa* en Marruecos. Dado el estado de conservación de las masas, la degradación del hábitat y la escasa regeneración, esta especie puede considerarse amenazada y debe contar con medidas de protección urgentes.

Palabras clave: aliso, *Alnus glutinosa*, límite del área de distribución, bosque de ribera, cartografía, dendrometría, conservación, Rif centro-occidental, Marruecos.

Introduction

Alnus glutinosa (L.) Gaertn. (Betulaceae) est un arbre monoïque caducifolié. Il s'agit d'une espèce de souche eurasiatique dont l'aire s'étend de la Sibérie occidentale aux montagnes de la Turquie et de l'Afrique du Nord (McVean, 1953). Elle est répartie dans des formations alluviales et riveraines du continent européen, dans les basses terres et les altitudes moyennes. En Afrique du Nord, sur la rive méridionale de la région méditerranéenne, elle est en limite de son aire de distribution. Au Maroc, cette espèce se trouve dans le Rif centro-occidental, région reconnue parmi les points chauds de la biodiversité méditerranéenne (Médail et Quézel, 1999) et considérée comme un carrefour biogéographique où se rencontrent différentes influences floristiques, méditerranéennes, eurasiennes et subtropicales (Arènes, 1951 ; Quézel, 2000). La présence de l'aulne dans cette région s'explique par les migrations vers les zones refuges au sud de l'aire de l'espèce pendant les phases glaciaires du Pléistocène (Lepais *et al.*, 2013 ; Douda *et al.*, 2014).

Ainsi, les populations marocaines se trouvent isolées en marge de l'aire de l'espèce avec une histoire démographique et évolutive complexe. La différenciation génétique par l'isolement se traduit par la polyploïdisation, qu'elles partagent avec d'autres populations en limite d'aire, en péninsule ibérique et dans les Alpes dinariques (Lepais *et al.*, 2013 ; Havrdová *et al.*, 2015). Des travaux récents (Vit *et al.*, 2017) ont même proposé de créer un nouveau taxon de rang spécifique, *Alnus lusitanica*, pour les populations ibériques et marocaines. D'une manière générale, la comparaison des populations diploïdes d'*A. glutinosa* avec les populations tétraploïdes montre que ces dernières présentent une plus grande richesse allélique et une diversité génétique plus élevée, marquant une nette distinction génétique au sein de l'espèce (Havrdová *et al.*, 2015 ; Mandák *et al.*, 2016). La résilience de ces populations face aux changements climatiques du passé leur confère une importance particulière pour les approches prédictives dans le contexte des changements climatiques déjà en cours. Ces populations doivent avoir un statut prioritaire pour la conservation eu égard à leur intérêt biogéographique, leur diversité et leur singularité génétique, ainsi que leur potentiel adaptatif face aux changements climatiques.

Au Maroc, bien que *A. glutinosa* soit considéré comme une espèce rare (Fennane et Ibn Tattou, 1998) et quasi menacée nécessitant des mesures de protection (Fennane, 2017), cet arbre ne bénéficie d'aucune mesure de protection et les données sur la répartition et la dynamique de ses populations sont inexistantes. Pourtant, cette espèce occupe des habitats vulnérables, principalement dans des formations rivulaires le long des cours d'eau. Dans son contexte local, elle est surexploitée même si elle n'offre pas de véritables opportunités de valorisation commerciale (Benamar, 2005). En effet, son usage porte sur la production d'unités fourragères en période de disette par la pratique de l'émondage, de la récolte de bois de chauffage et la fabrication de certains articles domestiques (ustensiles de cuisine, planches pour écriture des écoles coraniques, mancherons et clous de charrue...).

Ce travail représente une contribution à la connaissance de la répartition et de la dynamique des peuplements de l'aulne glutineux, *A. glutinosa*, au Maroc et constitue un apport important à d'éventuelles approches de conservation. En effet, en plus de la localisation et la cartographie des aulnaies, les travaux réalisés dans cette étude permettent de connaître la structure et la dynamique des peuplements à la faveur de l'analyse des paramètres dendrométriques.



Photo 2.

Jeune *Alnus glutinosa* dans un petit cours d'eau à Tayenza (Rif occidental) en hiver pendant la floraison.

Young Alnus glutinosa in a small stream in Tayenza (Western Rif) in winter during flowering.

Photo M. Ater.

Méthodes

Cartographie des peuplements

La cartographie des populations à *A. glutinosa* est basée sur la démarche habituelle de la cartographie forestière (Rondeux, 1999) avec des adaptations relatives aux peuplements résiduels et des ripisylves (Bensettiti, 1995). L'exploration de l'aire naturelle de l'aulne glutineux a été planifiée en se basant sur les cartes d'aménagement forestier et les données bibliographiques disponibles. Étant donné que l'espèce est considérée comme rare (Fennane et Ibn Tattou, 1998 ; Hammada *et al.*, 2002 ; Fennane, 2017), nous avons procédé à une enquête auprès des agents forestiers et de la population locale (particulièrement les bergers) pour optimiser nos campagnes de terrain. Les résultats des enquêtes ont permis d'orienter les prospections vers les cours d'eau où l'espèce a été déjà observée. Une combinaison de la carte des ressources en eau superficielle (ABHL, 2011) et de la lithologie a été réalisée à l'aide du logiciel ArcMap (ArcGis 10.3), pour identifier les cours d'eau permanents sur substrats siliceux, conditions considérées comme optimales pour l'aulne. Ensuite, la cartographie a été affinée par arpentage terrestre et complétée par analyse des photos aériennes de la mission photographique de 2003 et des images satellites sur l'application Google Earth Pro.

Choix des sites représentatifs

Compte tenu de la nature fragmentée des aulnaies marocaines, il est opportun de délimiter des unités géographiques représentatives des peuplements pour réaliser l'étude des caractéristiques dendrométriques. Ainsi, un site représentatif correspondrait à une station située en forêt avec un peuplement à aulne glutineux présentant une densité minimale de 3 m² de ripisylves par hectare et située au sein d'une unité hydrographique (sous bassin versant) avec une géologie relativement homogène.

Les unités hydrographiques ont été délimitées automatiquement avec l'outil *Watershed* du logiciel ArcMap (ArcGis 10.3) pour atteindre le seuil de densité fixé précédemment. Les noms attribués aux unités correspondent aux noms reconnus localement.

Typologie des peuplements

Une typologie physiologique simplifiée a été adoptée pour caractériser la structure des peuplements. Elle est basée sur trois critères : la composition, le recouvrement de la strate arborée et le régime du peuplement. Pour la composition, deux classes ont été retenues : peuplement pur à aulne (Ag), et peuplement mixte avec *Prunus lusitanica* L. (Ag-Pl). Un peuplement arborescent est considéré pur lorsque l'essence ciblée a un recouvrement supérieur ou égal à 75 %. Pour l'estimation des recouvrements, sachant que ce type de formation se présente en bandes linéaires étroites, nous avons utilisé les recouvrements linéaires (Rondeux, 1999 ; Delassus *et al.*, 2014). Les classes de

recouvrement retenues sont les suivantes : dense, notée (1) pour un recouvrement de plus de 50 % ; densité moyenne, notée (2) pour un recouvrement entre 50 % et 25 % ; claire, notée (3) pour un recouvrement entre 25 % et 10 % ; éparsé, notée (4) pour un recouvrement linéaire compris entre 10 % et 5 %. Enfin, pour le régime forestier, deux types ont été considérés : le régime de la futaie désigné par (f) et celui du taillis désigné par (t).

Caractéristiques dendrométriques des peuplements

Échantillonnage

Pour chaque site, un inventaire systématique a été réalisé pour 20 à 28 placettes correspondant chacune à un segment de 30 m de longueur avec répartition égale entre les deux rives. Le nombre de placettes a été déterminé à partir d'un inventaire préliminaire de dix placettes suivant la méthode de Lanly (1963) basée sur l'utilisation du coefficient de variation et de l'erreur type du paramètre mesuré. Pour chaque placette, nous avons relevé les données relatives à la densité et aux paramètres dendrométriques des arbres. La hauteur a été mesurée à l'aide d'un dendromètre Blume Leiss-BL6 et le diamètre des troncs avec celle d'un compas forestier positionné à une hauteur de 1,30 m.

Structure des peuplements

La structure des peuplements à *A. glutinosa* a été analysée sur la base de la distribution des diamètres des arbres. La distribution de Weibull est couramment adoptée dans ce type d'approche (Geary *et al.*, 1985 ; Rondeux, 1999 ; Kebezikato *et al.*, 2014) car elle offre une grande souplesse en matière de modélisation. À cet effet, elle a été utilisée pour représenter la structure théorique de chaque peuplement sur la base de la fonction de densité de probabilité (Rondeux, 1999) :

$$f(x) = \frac{c}{b} \left(\frac{x-a}{b} \right)^{c-1} e^{-\left(\frac{x-a}{b} \right)^c} \text{ (équation 1)}$$

où x est le diamètre des arbres, a est le paramètre d'origine, b est le paramètre d'échelle lié à la valeur centrale des diamètres, c est le paramètre de forme lié à la structure en diamètres. Le paramètre d'origine (a) a été fixé à 7 cm, envisagé comme valeur seuil au stade perchis où les individus peuvent être considérés comme des arbres (Rondeux, 1999). L'estimation des paramètres b et c a été effectuée avec le logiciel de statistique SPSS, version 20 par l'ajustement à une fonction non linéaire et l'évaluation de la corrélation par le coefficient de Spearman.

Traitement des données

Pour les différents paramètres mesurés, nous avons calculé les moyennes, écarts-types et coefficients de variation. Les comparaisons intersites ont été testées par l'analyse de la variance et le test de Duncan pour les comparaisons multiples des moyennes. Les analyses statistiques des données, y compris les corrélations et l'ajustement à la distribution de Weibull, ont été réalisées par les logiciels SPSS version 20 et R studio version 3.4.0.

Résultats et discussion

Aire de répartition de l'aulne glutineux au Maroc

Pour délimiter l'aire de l'aulne glutineux, nous nous sommes basés sur une approximation de l'aire potentielle (figure 1) définie *a priori* en se basant sur les données disponibles de l'écologie, la chorologie et les affinités biogéographiques de l'espèce.

Au Maroc, les populations d'aulnes sont localisées dans la chaîne rifaine, plus particulièrement dans ses parties occidentale et centrale (Benamar, 2005). Du point de vue écologique, ce taxon privilégie les bioclimats subhumides à perhumides à hiver chaud à frais au sens de Emberger (1955). Il s'agit donc d'altitudes moyennes à élevées correspondant aux niveaux supérieurs du thermoméditerranéen et inférieurs du mésoméditerranéen (Benabid, 1982). Le fait qu'il s'agisse d'une espèce riparienne, préférant les substrats acides, permet de mieux cerner son habitat et limiter son aire potentielle aux cours d'eau d'altitude moyenne à substrat schisto-gréseux du Rif centro-occidental. Bien que les données sur l'écologie et la répartition de cette espèce soient relativement rares, la chorologie supposée de l'espèce se limite à deux zones floristiques, le Tangérois et le Rif centro-occidental (Fennane et Ibn Tattou, 2005), qui correspondent bien à l'aire potentielle que nous avons définie. La nature de l'habitat est également confirmée car l'espèce a été observée uniquement dans les ripisylves (Ennabili et Ater, 1996 ; Ater *et al.*, 2008). Benamar (2005) a localisé des sites naturels de l'aulne dans les affluents de l'Oued Laou au niveau de la chaîne gréseuse de la région de Chefchaouen (figure 1). Les données des arpentages de localisation *in situ* ont été traitées pour produire une carte de localisation des peuplements à *A. glutinosa* (figure 2). Cette carte représente les sites où les peuplements à aulnes ont été identifiés et géoréférencés. Elle correspondrait à l'aire de répartition actuelle de l'espèce. Il apparaît que l'aulne glutineux est présent exclusivement dans un habitat rivulaire alors qu'en Algérie il peut occuper également, comme c'est le cas en Europe, des habitats relevant de marais (Belouahem-Abed *et al.*, 2012 ; Toubal *et al.*, 2014).

Les peuplements recensés s'étalent sur un gradient altitudinal où ils peuvent atteindre des altitudes relativement élevées, jusqu'à 1 581 m au niveau du Jbel Khézana et 1 603 m à Tayenza. D'une manière générale, les peuplements remarquables se situent dans une tranche altitudinale comprise entre 500 et 1 100 m d'altitude. Cependant, nous avons observé des peuplements de basse altitude, comme c'est le cas à l'Oued Lakhmis, entre 78 et 240 m. Mais les aulnaies y sont très fragmentées et éparées avec des arbres très distants les uns des autres. Certains pieds isolés ont été observés pratiquement au niveau de la mer, comme c'est le cas dans la partie basse de la plaine alluviale de l'Oued Laou. Sur le plan physiognomique, les peuplements d'aulnes se présentent sous formes d'alignements fragmentés colonisant les rives des cours d'eau. Dans le Rif occidental, ils occupent essentiellement des substrats de grès numidiens, alors que vers l'est, dans le Rif central, des peuplements

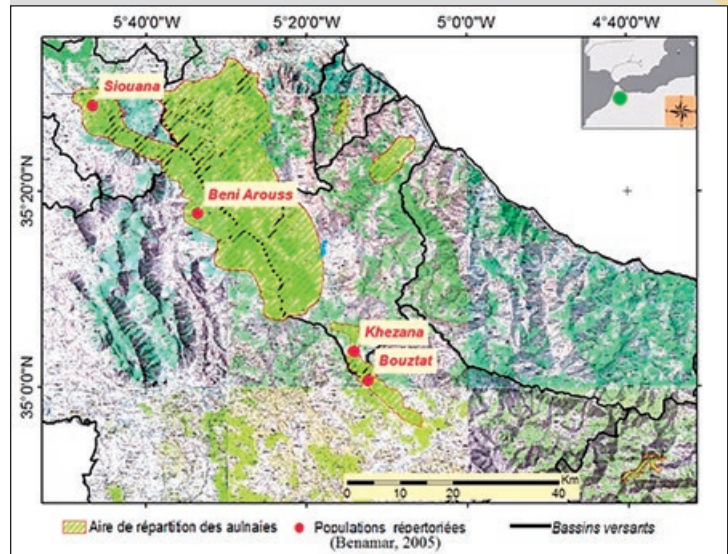


Figure 1.

Aire de répartition potentielle de l'aulne glutineux, *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn., sur fond topographique correspondant au montage des feuilles topographiques de Tanger, Tétouan, Larache, El Ksar Lakbir, Chefchaouen, Jebba, Beni Boufrah, Ouazzane, Zoumi et Ghafsay au 1/100 000. Potential distribution area of the black alder, *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn., on a topographic background corresponding to the topographic sheets of Tanger, Tetouan, Larache, El Ksar Lakbir, Chefchaouen, Jebba, Beni Boufrah, Ouazzane, Zoumi and Ghafsay at the scale of 1:100 000.

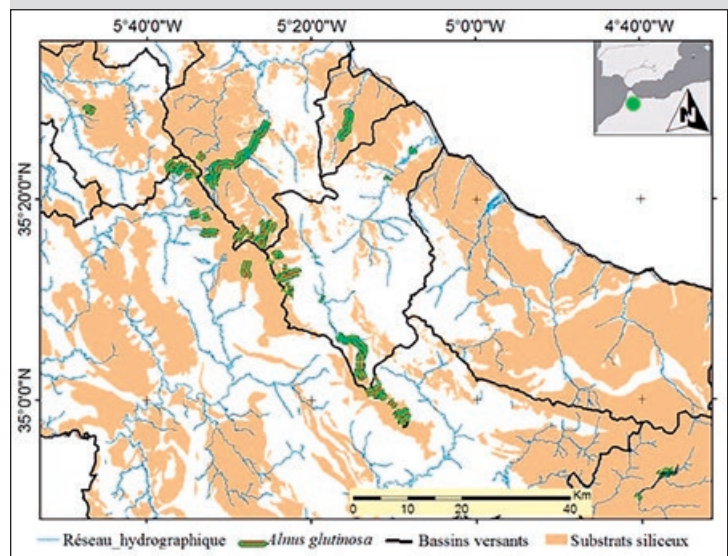


Figure 2.

Cartographie des peuplements inventoriés d'aulnes glutineux, *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. Mapping of inventoried stands of black alder, *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.

moins étendus sont installés sur d'autres types de substrats comme les schistes. D'une manière générale, ces cours d'eau sont très pentus, étroits et à forts débits pendant la saison humide. La plupart sont des affluents de cours d'eau plus importants situés à des altitudes plus basses. Étant

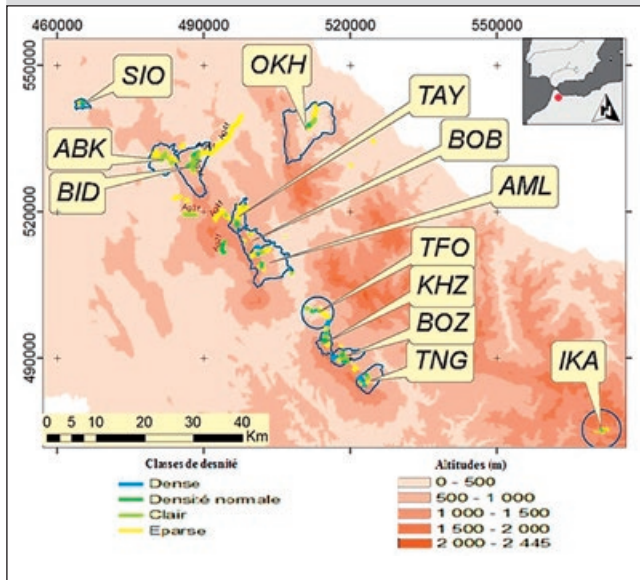


Figure 3.

Carte de localisation de sites remarquables et typologie des peuplements à *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. Pour le code des peuplements, voir le tableau I.
Location map of outstanding sites and stand typology of *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. For stand codes see Table I.

donné ces caractéristiques hydrologiques, les lits des cours d'eau sont généralement étroits avec des berges pentues. Ainsi, les ripisylves sont peu larges, la plupart ne dépassant pas 3 m de part et d'autre, mis à part certaines parties du réseau où le lit peut s'élargir, comme c'est le cas pour l'Oued Laou (Ater *et al.*, 2008). Du point de vue de l'étagement altitudinal des formations végétales, les formations à aulnes sont remplacées en altitude vers l'amont par des formations à *Prunus lusitanica* et vers le bas par des formations à *Salix purpurea* ou *Nerium oleander* à l'aval.

Reconnaissance et délimitation de sites représentatifs

L'aspect fragmenté et dispersé des aulnaies rend difficile le choix des sites pour la caractérisation des peuplements. Il fallait repérer et délimiter des tronçons de ripisylves avec des densités appréciables en aulnes glutineux. En d'autres termes, il s'agissait de délimiter des sites remarquables de référence pour la caractérisation des peuplements. Pour cela, nous avons tenu compte de la répartition géographique des unités hydrographiques et de l'accessibilité des sites. Ainsi, nous avons identifié douze sites que nous estimons représentatifs des peuplements d'aulnes dans la région (figure 3). Ces sites ont été nommés en se basant sur la toponymie et les noms utilisés localement. Pour chaque site, les principales données hydrographiques, climatiques et relatives aux sols ont été rassemblées (tableau I, annexe 1). Ces sites sont caractérisés par

Tableau I.

Caractéristiques physiques et bioclimatiques des sites de référence reconnus dans l'aire d'étude.
Physical and bioclimatic characteristics of recognised reference sites in the study area.

Code	Localité	Latitude Nord	Longitude Ouest	Bassin versant	Substrat	Alt-min	Alt-max	M °C	m °C	P mm	Q2 mm/°K	Bioclimats
ABK	Ain Kourra	5°35'14"	35°23'15"	Loukkos	G-P + M-Ab	240	1 377	27	2,1	1 772,13	247,5	PH-F
AML	Amlay	5°21'44"	35°10'39"	Oued Laou	G-P ; Ca-M-Ab	285	1 412	33,5	5,5	1 005,20	122,74	H-T
BID	Beni Idder	5°32'6"	35°22'33"	Martil	G-P	200	1 377	33,9	6,3	1 108,00	136,97	H-T
BOB	Boubiyine	5°24'8"	35°13'40"	Oued Laou	G-P ; M-Ab	485	1 396	33,5	5,5	1 005,20	122,74	H-T
BOZ	Bouzzat	5°11'42"	35°0'33"	Loukkos	P-Ab + G-P	985	1 505	32,5	2,5	1 482,20	170,07	H-F
IKA	Ikaouen	4°37'11"	34°52'43"	Sebou	Sch	1 280	1 308	28	1	1 616,00	208,18	PH-F
KHZ	Khezana	5°13'56"	35°2'15"	Oued Laou	G-M + Ca-M	654	1 562	32,5	2,5	1 482,20	170,07	H-F
OKH	Oued Lakhmis	5°17'15"	35°25'26"	Oued Lakhmis	G-P	78	240	28,9	8,6	464,5	78,43	SH-C
SIO	Siouana	5°46'48"	35°28'42"	Oued Lakbir	G-P	64	596	32	6,1	816,8	107,98	H-T
TAY	Tayenza	5°26'8"	35°15'57"	Martil	G-P + Ab-Ca	514	1 603	27	2,1	1 772,13	247,5	PH-F
TFO	Tifouzal	5°14'16,6"	35°5'39"	Oued Laou	Ca-M	385	390	33,5	5,5	1 005,20	122,74	H-T
TNG	Tanghaya	5°9'8"	35°58'22"	Loukkos	G-P + Ab-G	846	1 477	32,5	2,5	1 482,20	170,07	H-F

Substrat. G : grès ; P : pélites ; Ab : argile bariolée, Ca : calcaire ; M : marne ; Sch : schiste. Climat. M °C : moyenne des maxima du mois le plus chaud de l'année ; m °C : moyenne des minima du mois le plus froid de l'année ; P : moyenne des précipitations annuelles en mm ; Q2 : quotient pluviométrique d'Emberger. Source : Agence des bassins hydrauliques de Loukkos (ABHL).

Alt-min : altitude à la base de la population ; Alt-max : altitude au sommet de la population. Bioclimat. PH : perhumide ; H : humide ; SH : subhumide ; variants : hiver : F = frais ; T = tempéré ; C = chaud.

Tableau II.

Typologie et caractérisation des peuplements de référence à *Alnus glutinosa*.
*Typology and characterisation of reference stands of *Alnus glutinosa*.*

Peuplement	Futaie pure (longueur (m) / nombre de tronçons)				Taillis pur			Peuplement mixte Ag3f-Pl3f	Total	Longueur moyenne (m)	Densité (pieds/100 m)
	Ag1f	Ag2f	Ag3f	Ag4f	Ag1t	Ag2t	Ag4t				
ABK		97 / 1	4 148 / 8	5 108 / 8					9 353 / 17	550,18	6,43 ± 4,54
AML	185 / 1	1 277 / 3	2 200 / 2	3 342 / 8		60 / 1			7 064 / 15	470,93	11,67 ± 5,33
BID		4 022 / 2	6 560 / 4	4 166 / 2					1 4748 / 8	1 843,50	9,7 ± 6,91
BOB	962 / 3	296 / 1	761 / 3	608 / 1					2 627 / 8	328,38	16,83 ± 6,87
BOZ	1 695 / 1	1 324 / 2	3 007 / 2	1 461 / 3	101 / 1				7 588 / 9	843,11	18,19 ± 8,47
IKA		263 / 1	689 / 2	601 / 2					1 553 / 5	310,6	10,83 ± 7,67
KHZ	1 603 / 4	1 089 / 3	1 322 / 4	1 452 / 2					5 466 / 13	420,46	17,33 ± 6,53
OKH		925 / 1	1 945 / 2	4 164 / 3					7 034 / 6	1 172,33	11,33 ± 8,33
SIO	682 / 2	329 / 2	406 / 1	727 / 1					2 144 / 6	357,33	13,33 ± 4,67
TAY	2 819 / 8	919 / 3	1 019 / 1			341 / 1	631 / 1	637 / 1	6 366 / 15	424,4	9,62 ± 4,77
TFO		1 282 / 2	1 355 / 2	4 082 / 3					6 719 / 7	959,86	14,5 ± 6,83
TNG	2 047 / 2	463 / 1	1 644 / 3	2 888 / 1					7 042 / 7	1 006,00	27,83 ± 6,85
Total	9 993 / 21	12 286 / 22	25 056 / 34	28 599 / 34	101 / 1	401 / 2	631 / 1	637 / 1	77 704 / 116	669,86	
%	12,86	15,81	32,25	36,81	0,13	0,52	0,81	0,82	100,00		

Ag et Ag-Pl désignent la composition pure et mixte des peuplements. Les chiffres de 1 à 4 correspondent aux classes de recouvrement. Les lettres f et t désignent le régime en futaie ou taillis. Pour plus de détails, voir le chapitre Méthodes.

des bioclimats perhumides ou humides, mis à part celui de l'Oued Lakhmis qui a un bioclimat subhumide (annexe 1). En effet, les précipitations sont généralement abondantes, variant de 1 000 mm à 1 770 mm, à l'exception du site de l'Oued Lakhmis où elles sont nettement inférieures avec seulement 464 mm (tableau I). D'une manière générale, les hivers sont de type frais à tempéré et les températures estivales restent modérées. La lithologie est dominée par des substrats acides (gréseux ou schisteux).

Typologie des peuplements

L'approche adoptée pour la typologie des peuplements d'aulnes dans les sites de référence a permis d'en préciser les principales caractéristiques comme la nature du régime forestier, la composition, la taille et les densités (figure 3, tableau II). En ce qui concerne le régime forestier, comme il s'agit de peuplements naturels issus de semis, ils sont constitués quasiment de peuplements en futaie (97,7 %). Cependant, on peut observer des peuplements en taillis dans des sites perturbés où des coupes ont été pratiquées ; mais ils sont rares et représentent moins de 2 % des peuplements. Ils ont été observés dans trois sites, principalement à Tayenza et en moindre importance à Bouzdat et Amlay. Ceci ne veut pas dire, toutefois, que les autres sites sont non impactés par les coupes.

D'une manière générale, la composition des peuplements est à peu près pure, l'aulne représentant l'espèce dominante de la strate arborescente. Cependant, il existe des peuplements mixtes avec *Prunus lusitanica*. Mais

ceux-ci sont relativement rares et représentent moins de 1 % des peuplements. Ces peuplements mixtes se situent au niveau de la limite altitudinale supérieure d'*A. glutinosa* et forment la transition avec des ripisylves pures à *P. lusitanica* en altitude.

Les peuplements d'aulnes se présentent sous forme de formations en couloirs étroits et discontinus avec une structure fragmentée. Dans les sites de référence, les aulnaies sont constituées de fragments d'une longueur moyenne de 670 m dont le nombre varie entre 5 à Ikaouen et 17 à Ain Kourra. Cependant, il faut prendre en considération l'importance de la variabilité de ces paramètres aussi bien à l'intérieur des sites qu'entre les sites (tableau II). Ainsi, la longueur moyenne des fragments par site varie entre 310 m à Ikaouen et 1 843 m à Beni Idder. De même, la taille globale des peuplements par site varie beaucoup entre les sites, cela dans un large intervalle compris entre une longueur totale de 1 553 m pour Ikaouen et 14 748 m pour Beni Idder.

Les peuplements épars (classe Ag4) avec 37,6 % et les ripisylves claires (classe Ag3) avec 33,1 % sont de loin les plus représentatifs en totalisant 70,7 % des peuplements (tableau II, figure 3). Ces deux catégories s'apparentent à des peuplements très fragmentés avec des arbres distants à isolés. Les peuplements à densité normale (classe Ag2) ou dense (Ag1), qui s'apparentent à des structures en couloir continu ou discontinu, représentent seulement 29 % des peuplements. D'une manière générale, la majorité des peuplements denses se trouvent en moyenne altitude sur des expositions Nord-Est.

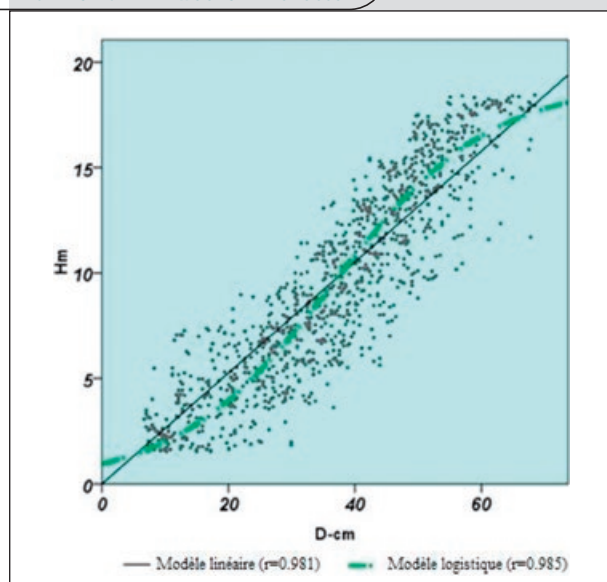


Figure 4.
Corrélations entre hauteur (Hm) et diamètre (D-cm) des arbres suivant les deux modèles linéaire et logistique. r est le coefficient de corrélation.
Correlations between tree height (Hm) and diameter (D-cm) according to both linear and logistic models. r is the correlation coefficient.

Pour la structure des peuplements et en complément aux données relatives aux recouvrements, les résultats de l'inventaire ont permis d'estimer les densités (tableau II). La densité moyenne varie entre une valeur minimale de $6,19 \pm 4,29$ pieds/100 m pour Ain Kourra et une valeur maximale de $28,33 \pm 8,33$ pieds/100 m pour Tanghaya.

Caractéristiques dendrométriques des peuplements

D'une manière générale, les paramètres dendrométriques reflètent la croissance des arbres. Cette dernière peut être considérée comme la résultante du potentiel physiologique déterminé génétiquement et la réponse aux conditions de l'environnement correspondant à la plasticité phénotypique. La hauteur des arbres est un paramètre important en foresterie car celui-ci renseigne d'une manière directe sur la qualité et l'état d'un peuplement. Le diamètre des arbres est un paramètre plus facile à mesurer, qui renseigne non seulement sur la croissance mais aussi, indirectement, sur l'âge des arbres. Il est parfois difficile d'estimer la hauteur des arbres, d'où l'intérêt des corrélations entre hauteur et diamètre, qui ont fait l'objet de nombreuses études pour différentes essences (Castedo Dorado *et al.*, 2005 ; Newton et Amponsah, 2007). Pour les peuplements étudiés, la corrélation entre ces deux paramètres est hautement significative avec des coefficients de corrélation supérieurs à 0,9 pour les deux modèles, linéaire et logistique (figure 4). Avec un coefficient de détermination $r^2 = 0,81$, la régression permet une bonne estimation de la hauteur des arbres à partir de leur diamètre.

La hauteur moyenne des arbres dans le nord du Maroc est de $9,53 \pm 4,62$ m (tableau III, figure 5). C'est une hauteur sensiblement inférieure à celles observées pour d'autres peuplements dans l'ouest de la Méditerranée. En effet, dans la péninsule ibérique, la hauteur moyenne observée en Espagne est de $14,45 \pm 5,04$ m (Rodríguez-González, 2004) et $14,05 \pm 4,33$ m au Portugal (Rodríguez-González *et al.*, 2014). De même, en Algérie où se trouve la deuxième zone refuge d'aulnes en Afrique du Nord, la hauteur moyenne est

Tableau III.
Caractéristiques dendrométriques des peuplements de référence.
Dendrometric characteristics of reference stands.

Peuplement	Nombre		Diamètre Moyen (cm)	CV (%)	Hauteur Moyenne (m)	CV (%)
	Placettes	Arbres				
ABK	28	54	$35,17 \pm 13,9$ b	39,51	$6,59 \pm 2,89$ b	43,83
AML	20	70	$37,38 \pm 12,68$ b	33,93	$7,09 \pm 3,84$ b	54,1
BID	22	64	$28,76 \pm 15,25$ a	53	$6,98 \pm 3,25$ b	46,51
BOB	20	101	$38,79 \pm 12,63$ b	32,56	$10,3 \pm 4,73$ c	45,94
BOZ	24	131	$39,84 \pm 12$ b	30,11	$10,91 \pm 4,29$ c	39,27
IKA	20	65	$41,37 \pm 13,43$ b	32,48	$10,33 \pm 4,94$ c	47,85
KHZ	20	104	$28,68 \pm 15,76$ a	54,94	$8,87 \pm 4,64$ c	52,3
OKH	20	68	$25,05 \pm 15,44$ a	61,63	$6,35 \pm 3,43$ b	54,12
SIO	20	80	$38,29 \pm 14,24$ b	37,18	$10,36 \pm 4,41$ c	42,56
TAY	26	75	$38,55 \pm 14,27$ b	37,01	$9,41 \pm 4,8$ c	51
TFO	20	87	$39,59 \pm 13,05$ b	32,95	$9,03 \pm 4,29$ c	47,53
TNG	20	85	$41,47 \pm 12,32$ b	29,72	$12,26 \pm 4,17$ a	34,02
Moyenne totale			$36,77 \pm 14,67$	39,89	$9,53 \pm 4,62$	48,48
ANOVA			F = 7,045 ; Sig : 0,000		F = 6,630 ; Sig = 0,000	

Moyen \pm écart-type. Les lettres différentes (a, b, c) signifient que les moyennes sont significativement différentes selon le test de comparaisons multiples des moyennes de Duncan. CV : coefficient de variation. ANOVA : analyse de la variance à 1 critère. F : rapport de variance. Sig : significatif à $P < 0,001$.

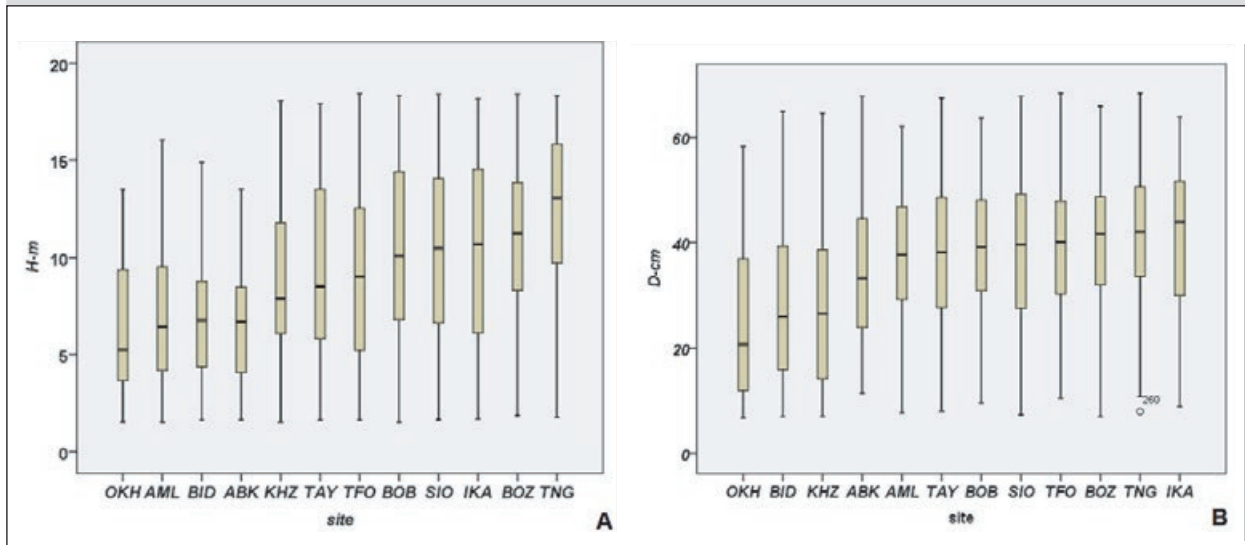


Figure 5.

Comparaison des distributions des hauteurs (A) et diamètres (B) des arbres d'*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. Pour le code des peuplements, voir le tableau I.

Comparison of height (A) and diameter (B) distributions of *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. For stand code see Table I.

de $12,82 \pm 4,50$ m (Belouahem-Abed, 2012). La hauteur inférieure des aulnaies marocaines s'expliquerait par le type d'écosystème et l'impact des activités humaines. L'habitat de l'aulne au Maroc correspond à des ripisylves présentes la plupart du temps dans des milieux fortement anthropisés. Cependant, la moyenne générale des hauteurs cache une grande variabilité aussi bien entre peuplements qu'à l'intérieur de ceux-ci. En effet, les moyennes estimées par peuplement varient entre $6,35 \pm 3,43$ m comme valeur minimale à l'Oued Lakhmis et $12,26 \pm 4,17$ m comme valeur maximale à Tanghaya (tableau III, figure 5). L'analyse de la variance montre que les variations intersites sont hautement significatives (tableau III). Ces variations correspondent à un gradient de taille opposant deux pôles : d'un côté des peuplements bas avec des arbres dont la hauteur est inférieure ou égale à 7 m et, de l'autre, des peuplements hauts dont la hauteur des arbres est de 12 m avec un seul site, Tanghaya. Les autres peuplements forment un groupe intermédiaire où les hauteurs sont comprises entre 8,87 m pour le peuplement de Khézana et 10,91 m pour le peuplement de Bouzdat. Cette classification en trois groupes est validée par le test de comparaisons multiples des moyennes (tableau III). Les variations intrapeuplement, estimées par les coefficients de variation, se sont montrées plus importantes dans les peuplements à hauteurs basses comme l'Oued Lakhmis avec 54,12 % de variation et, inversement, moins importantes pour les peuplements à hauteurs élevées comme Tanghaya, avec seulement 34,02 %. Ainsi, les peuplements à hauteurs basses semblent moins homogènes et correspondraient à des peuplements dynamiques plus jeunes, à l'opposé des peuplements à hauteurs supérieures qui seraient plus âgés avec une régénération faible. Cette différenciation des peuplements par les hauteurs des arbres serait en relation avec la structure des peuplements, les conditions écologiques des sites et la pression anthropique occasionnée par les

prélèvements de bois et feuillages pour des usages domestiques. En effet, les peuplements de hauteurs supérieures sont des peuplements denses et à recouvrements élevés avec des tronçons courts, l'inverse s'observant pour les peuplements de hauteurs basses. Du point de vue des conditions écologiques et de la qualité de l'habitat, les peuplements de hauteurs supérieures se trouvent dans des sites d'altitude avec des précipitations élevées et des conditions hydrologiques plus favorables.

Le diamètre moyen mis en évidence dans les peuplements du nord du Maroc est de l'ordre de $36,8 \pm 14,7$ cm (tableau III, figure 5). Il est similaire à celui observé en Espagne avec $35,2 \pm 12,4$ cm (Rodríguez-González *et al.*, 2004) et au Portugal avec $36,3 \pm 13,9$ cm (Rodríguez-González *et al.*, 2014). En Algérie, les aulnaies présentent au contraire des diamètres inférieurs, avec un diamètre moyen de $29,8 \pm 13,9$ cm (Belouahem-Abel, 2012). Les résultats obtenus montrent une structuration similaire à celle des données relatives à la hauteur des arbres, avec une variabilité intrasite et intersites relativement élevée. Ainsi, les diamètres moyens des arbres s'étendent le long d'un gradient entre 25,1 cm à l'Oued Lakhmis et 41,5 cm à Tanghaya (tableau III, figure 5). L'analyse de la variance montre que ces variations entre les peuplements sont hautement significatives, permettant une discrimination des peuplements par les diamètres des arbres. En effet, la comparaison multiple des moyennes permet de distinguer deux groupes : un groupe avec de faibles diamètres comprenant trois sites, l'Oued Lakhmis, Khézana et Beni Idder ; un groupe comprenant le reste des sites avec des diamètres supérieurs compris entre 35,2 cm pour Ain Kourra et 41,5 cm pour Tanghaya. La variation intrapeuplement est nettement plus élevée chez les peuplements de faibles diamètres et atteint 61,63 % pour l'Oued Lakhmis alors qu'elle est seulement de l'ordre de 29,72 % pour le peuplement de Tanghaya à diamètres élevés.

Les peuplements d'aulnes étudiés ont montré une forte variabilité des paramètres dendrométriques, cela malgré une aire de répartition réduite. Il se manifeste une gradation des peuplements en fonction de la taille et la grosseur des arbres. Elle correspond à une différenciation de la structuration des peuplements. Suivant les sites, les peuplements présentent des caractéristiques différentes. En altitude, sous des conditions favorables, les peuplements sont denses, plus homogènes, avec des arbres plus hauts et des diamètres élevés.

Au contraire, vers le bas, les peuplements sont éparés, les arbres restent très distants, avec des arbres moins hauts et des diamètres nettement inférieurs.

Structure et dynamique des populations

Le diamètre des arbres est considéré comme un paramètre intégrateur pour décrire les propriétés structurales et démographiques d'un peuplement forestier. En effet, la distribution des diamètres des arbres traduit indirectement la distribution des âges et permet d'apprécier la structure et la dynamique des peuplements. Selon les modèles démographiques de l'écologie des populations (MacArthur et Wilson, 1967 ; Pianka, 1970), la distribution des âges permet de reconnaître différents états chez les populations de plantes en fonction de la succession et de la stratégie reproductive.

L'interprétation des distributions des diamètres permet de renseigner la dynamique des peuplements, qui peut correspondre à différents états : stable, en déclin ou dégradé (Molinas *et al.*, 1991 ; Rondeux, 1999 ; Ajbilou *et al.*, 2003). La structure des peuplements illustrée par la distribution des classes de diamètre (annexe 2) montre une forte variabilité et des situations bien contrastées. Dans ce sens, l'ajustement de la distribution des diamètres à la distribution théorique de Weibull (Bullock et Burkhart, 2005) permet de mieux caractériser la structure des peuplements forestiers (figure 6). Les paramètres de la distribution permettent d'interpréter les courbes et d'apprécier la dynamique des peuplements, spécialement le paramètre c qui caractérise la forme de la distribution (Hush et Scovel, 2003). Le résultat des ajustements des distributions des différents peuplements montre alors des formes variables et contrastées, que nous pouvons classer en quatre types de structures en fonction de la valeur du paramètre c :

- distributions avec $c < 1$ et une courbe en J inversée pour les peuplements de l'Oued Lakhmis et Khézana ; on peut parler d'une structure jardinée correspondant à un peuplement dynamique en régénération ;
- distributions avec $1 < c < 3,6$ et une courbe à asymétrie positive pour les peuplements Siouana, Beni Idder, Ain Kourra et Boubiyine ; ce type de distribution correspondrait à des peuplements avec un faible potentiel de régénération et une dominance d'individus de faible diamètre ;
- distributions avec $c = 3,6$ et une courbe en forme de cloche pour les peuplements Tayenza, Tifouzal et Amlay ; ce type de distribution caractérise des peuplements à faible potentiel de régénération ;
- distributions avec $c > 3,6$ et une courbe à asymétrie négative pour les peuplements Tanghaya, Bouzdat et Ikaouen ; ce

type de distribution caractérise généralement des peuplements dégradés à faible régénération.

S'agissant de la structuration des peuplements, on observe, d'une part, des peuplements dynamiques en régénération avec des arbres à petits diamètres fréquents dans les peuplements éparés à faible densité et, d'autre part, des peuplements présentant un faible taux de régénération et la dominance d'individus à diamètres élevés au sein de peuplements généralement plus denses. Dans le premier cas, il s'agit de stades primaires de succession correspondant à des situations très différentes. Par exemple, dans le cas de l'Oued Lakhmis, il s'agit d'un site ouvert avec une ripisylve sans strate arborée et une forte dynamique hydromorphologique où les conditions écologiques ne sont pas optimales pour l'espèce. À Khézana, les conditions sont plus favorables, mais le site est fortement perturbé par des pressions anthropogènes, principalement l'intensité des coupes. Dans le second cas, la dominance des individus âgés s'expliquerait par des raisons naturelles et des facteurs exogènes. En effet, à Tanghaya et Bouzdat, il s'agit de populations denses à recouvrement élevé où le recrutement d'individus juvéniles est faible. À Ikaouen, la faible régénération s'expliquerait en revanche par l'état dégradé du peuplement et la forte pression anthropogène.

Implications pour la conservation

Les données réunies par cette étude, qui concernent la localisation et la taille des populations ainsi que leur structure et leur dynamique, dressent un diagnostic inquiétant sur l'état de conservation d'*A. glutinosa* au Maroc. En effet, la taille de la zone d'occupation réelle est extrêmement réduite par rapport à la taille d'occurrence de l'espèce (figures 1 et 2). Cette zone est incluse géographiquement au sein d'une seule division floristique, ce qui confirme le statut de taxon rare au Maroc (Fennane et Ibn Tattou, 1998). En dépit de la nature linéaire des peuplements qui rend difficile l'évaluation de la superficie occupée par l'espèce, cette dernière pourrait être estimée à un maximum de 500 km² en se basant sur une longueur totale d'environ 80 km (tableau II) et une largeur moyenne de 6 m des ripisylves. L'aire de répartition représentée par les sites de référence adoptés dans ce travail est très fragmentée, répartie sur plusieurs cours d'eau secondaires et morcelés en 116 tronçons de longueurs et structures variables (tableau II). D'un autre côté, les données dendrométriques montrent que la régénération est faible pour la majorité des peuplements (figure 6), que ce soit pour des causes naturelles ou anthropogènes. En effet, la qualité de l'habitat de cette espèce est fortement dégradée à cause des déficits hydriques aggravés par la surexploitation des ressources en eau selon une pratique courante de captage des eaux en amont par les populations riveraines. Cependant, les aulnaies du nord du Maroc occupent des paysages ruraux fortement occupés par les populations humaines. Certains sites comme Siouana, Khezana, Amlay, Boubiyine ou Ikaouen hébergent des habitations rurales dispersées dans de petits hameaux, ce qui accroît les impacts de l'écimage, des parcours ou de l'agriculture. Ce type d'écosystème ressemble parfois à la

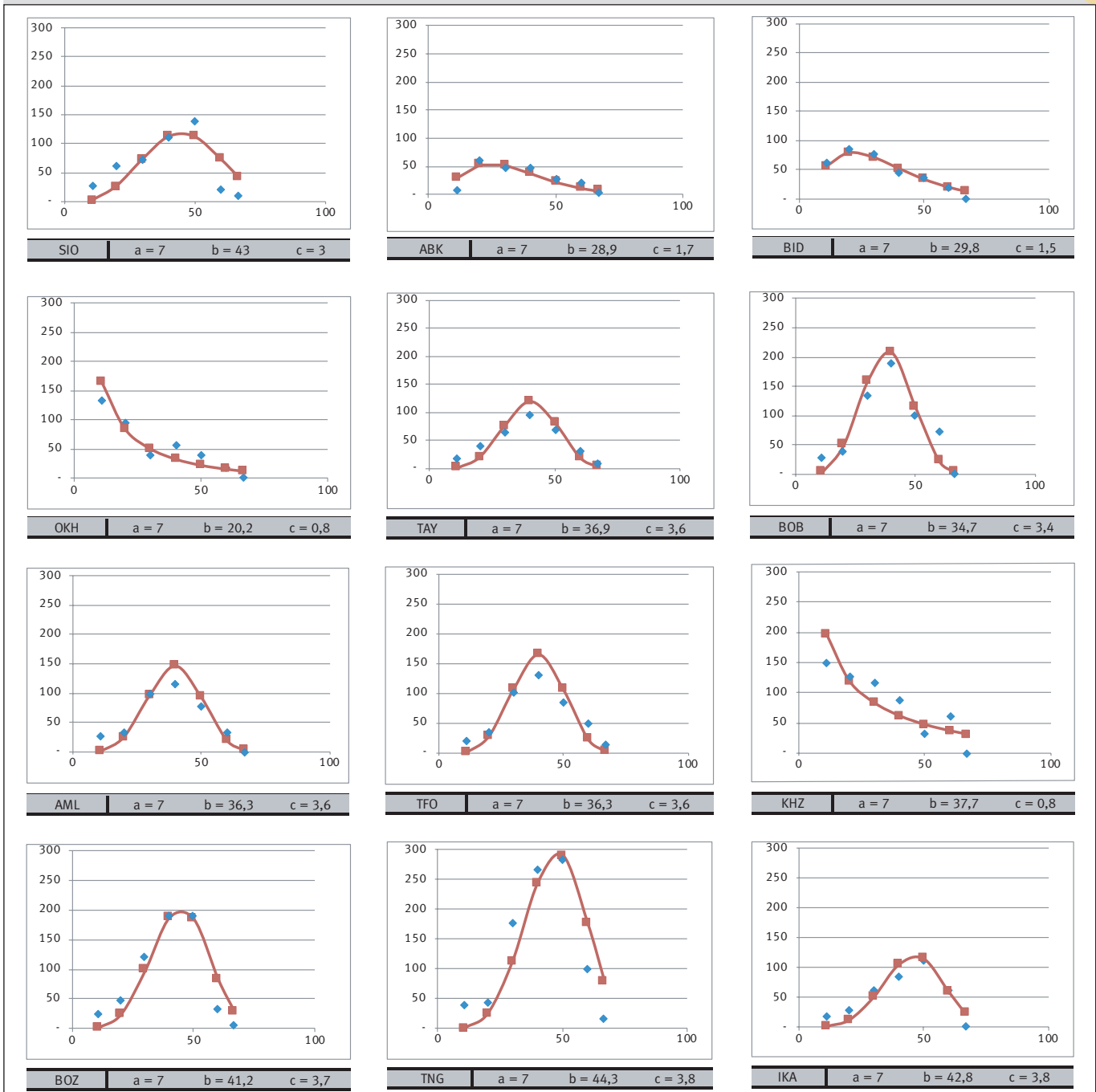


Figure 6.

Ajustement à la distribution de Weibull des fréquences (pieds/ha) en fonction des diamètres (cm) des arbres. *a* : paramètre d'origine ; *b* : paramètre d'échelle ; *c* : paramètre de forme (voir méthodes). Pour le code des peuplements, voir le tableau I.
 Fit to Weibull distribution of frequencies (feet/ha) versus tree diameters (cm). *a*: original parameter; *b*: scale parameter; *c*: shape parameter (see methods). For stand code see Table I.

forêt dite rurale ou paysanne (Simenel, 2011). Bien qu'il n'y ait pas de liste rouge officielle selon les critères de l'UICN au Maroc, Fennane a publié une telle liste. *A. glutinosa* y est classé dans la catégorie NT, c'est-à-dire *taxon quasi menacé* (Fennane, 2017). Eu égard aux données obtenues, l'état de conservation pour ce taxon reste sous-estimé. La

réduction de son aire et sa fragmentation, associées à une faible régénération et une dégradation de l'habitat, plaident en faveur de son classement dans les catégories menacées des listes rouges de l'UICN (2012) en tant que taxon en danger [EN]. Le contexte des changements globaux dans la région méditerranéenne aggrave cette menace (Pachauri

et al., 2014 ; Lionello et Scarascia, 2018), d'autant que ce taxon est fortement sensible au changement climatique (Rodríguez-González *et al.*, 2014). La conservation de cette espèce riparienne est conditionnée par la préservation de son habitat et de sa qualité. Or les formations ripariennes au Maroc ne bénéficient d'aucun statut particulier de protection. Du point de vue légal, ces formations font partie du domaine hydraulique public géré par les agences des bassins hydrauliques, comme le stipule la loi relative à l'eau (Loi n° 36-15 du 10 août 2016). Cependant, ces formations restent indirectement soumises au régime forestier bien qu'elles soient localisées dans le domaine hydraulique. L'administration des Eaux et forêts, en tant que responsable de la défense et la restauration du sol (Dahir n° 1-69-170

de 25 juillet 1969), participe à l'établissement des plans d'aménagement et de gestion des bassins hydrauliques. Cet écosystème est donc à la croisée des compétences de deux administrations, sans pour autant bénéficier d'un statut ou de mesures de protection spécifiques. L'adaptation du cadre légal avec la reconnaissance d'un statut spécifique est incontournable pour assurer la protection des habitats occupés par les formations ripariennes en général et celles de *A. glutinosa* en particulier.



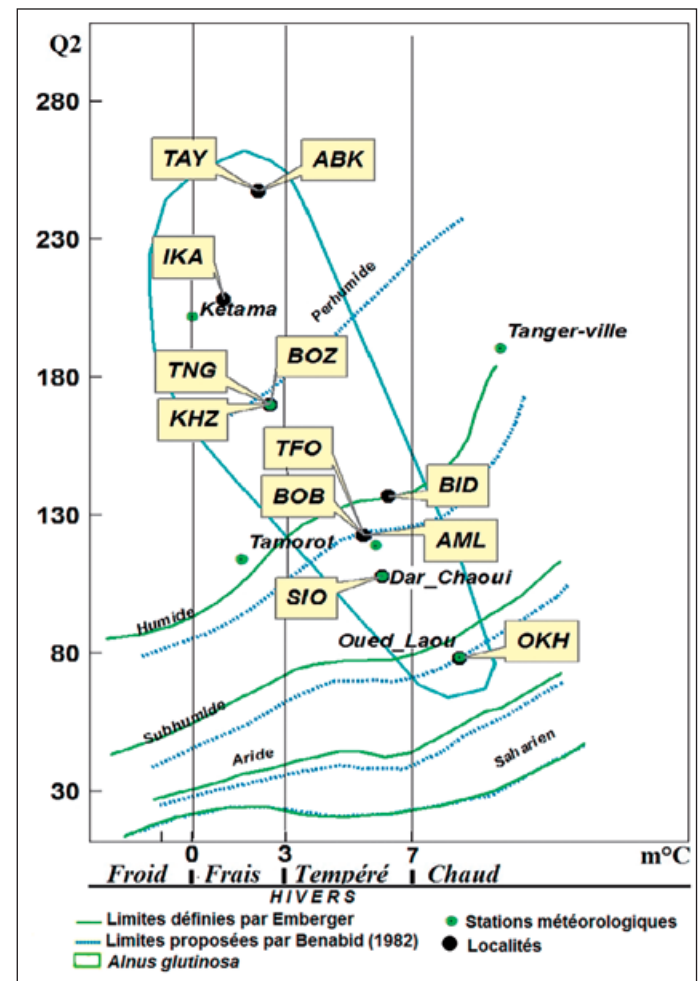
Photo 3.

Ripisylve à aulne et saules dans un affluent de l'Oued Laou (Oued Moulay Bouchta, Dar Aakobaa, Chefchaeun). Alder and willows riparian zone in a tributary of the Oued Laou (Oued Moulay Bouchta, Dar Aakobaa, Chefchaeun). Photo M. Ater.

Annexe 1.

Climagramme d'Emberger avec localisation des sites de référence et des stations météorologiques représentatives de la région.

Emberger climagram with location of reference sites and representative weather stations in the region.



Annexe 2.

Structures de peuplements illustrées par la distribution des fréquences (pieds/ha) en fonction des classes de diamètre (cm).
Stand structures illustrated by frequency distribution (feet/ha) according to diameter classes (cm).



Conclusion

Les résultats obtenus constituent un apport de données quantitatives géoréférencées permettant d'avoir une bonne connaissance de la répartition et la dynamique des peuplements d'*Alnus glutinosa* au Maroc. Bien qu'il ne s'agisse pas d'un inventaire exhaustif des peuplements d'aulnes, il s'agit de la première délimitation et caractérisation des peuplements marocains réalisées à une échelle aussi fine pour cette espèce. En plus de la cartographie des peuplements, cette étude a permis d'en caractériser la taille, le recouvrement, la densité et divers paramètres dendrométriques.

Les peuplements d'aulnes se présentent en couloirs étroits, discontinus et fragmentés. Il s'agit de peuplements en futaie où l'aulne représente l'espèce dominante de la strate arborée. Plus de 70 % des peuplements sont peu denses avec des arbres distants à isolés. Les caractéristiques dendrométriques montrent des variations hautement significatives aussi bien pour le diamètre que pour la

hauteur, cela aux niveaux intrasite et intersites. Ces variations sont en relation avec la densité des peuplements, les conditions écologiques et l'intensité des perturbations de l'habitat. Le type de structuration observé correspond à des dynamiques contrastées en fonction de la succession, des conditions écologiques et des perturbations. Un gradient apparaît selon quatre types de structure, gradient aux pôles duquel se présentent respectivement des peuplements peu denses, dynamiques, en régénération avec de petits diamètres, et des peuplements denses avec un faible taux de régénération et de grands diamètres.

Les données obtenues mettent en évidence un diagnostic alarmant sur l'état des peuplements et la qualité de leur habitat. Ce taxon doit être considérée comme menacé au Maroc et devrait bénéficier à court terme d'un statut de protection et d'un programme de conservation. Cela se justifierait par sa valeur patrimoniale comme taxon relictuel rare et son intérêt comme ressource génétique au regard de la singularité et de la diversité génétique des populations marocaines.

Remerciements

Les auteurs remercient les responsables des Directions régionales des eaux et forêts et de la lutte contre la désertification du Rif et du Nord-Est au Maroc pour les moyens humains et matériels mis à leur disposition afin de faciliter les investigations et enquêtes sur le terrain.

Références bibliographiques

- ABHL, 2011. Étude d'actualisation du plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau des bassins Loukkos, Tangérois et côtiers méditerranéens. Tétouan, Maroc, Agence du bassin hydraulique du Loukkos (ABHL).
- Ajbilou R., Marañón T., Arroyo J., 2003. Distribución de clases diamétricas y conservación de bosques en el norte de Marruecos. Investigación agraria. Sistemas y Recursos Forestales, 12 (2) : 111-123. <https://digital.csic.es/handle/10261/48574>
- Arènes J., 1951. À propos des connexions ibéro-marocaines et siculo-tunisiennes. Compte-rendu sommaire des séances de la Société de biogéographie, 241 : 67-72.
- Ater M., Radi M., Kadiri M., Qinba A., 2008. Ripisylves et avifaune du bassin versant de Oued Laou. Travaux de l'Institut scientifique, Rabat, Série générale, n° 5 : 27-35.
- Benabid A., 1982. Bref aperçu sur la zonation altitudinale de la végétation climacique au Maroc. Ecologia Mediterranea, 8 (1-2) : 301-315. https://www.persee.fr/doc/ecmed_0153-8756_1982_num_8_1_1956
- Belouahem-Abed D., 2012. Étude écologique des peuplements forestiers des zones humides dans les régions de Skikda, Annaba et El Tarf (Nord-Est algérien). Université Badji Mokhtar-Annaba, Algérie, 320 p.
- Benamar S., 2005. Contribution à la réhabilitation au Maroc de l'espèce forestière *Alnus glutinosa* par son étude écophysiological et la caractérisation moléculaire de son microsymbiote diazotrophe *Frankia*. Thèse de doctorat d'État. Université Moulay Ismail, Faculté des sciences de Meknès, Maroc, 244 p.
- Bensettiti F., 1995. Contribution à l'étude phytosociologique des ripisylves du Nord de l'Algérie. Essai de synthèse à l'échelle de la Méditerranée occidentale. Thèse, Université Paris-Sud, France, 180 p.
- Bullock B. P., Burkhart H. E., 2005. Juvenile diameter distributions of loblolly pine characterized by the two-parameter Weibull function. New Forests, 29 (3): 233-244. <https://doi.org/10.1007/s11056-005-5651-5>
- Castedo Dorado F., Barrioanta M., Parresol B. R., Álvarez Gonzalez J. G., 2005. A stochastic height-diameter model for maritime pine ecoregions in Galicia (northwestern Spain). Annals of Forest Science, 62: 455-465. <https://doi.org/10.1051/forest:2005042>
- Delassus L., Magnanon S., Colasse V., Glémarex E., Guitton H., Laurent E., et al., 2014. Classification physiologique et phytosociologique des végétations de Basse-Normandie, Bretagne et Pays de la Loire. Brest, France, Conservatoire botanique national de Brest, 262 p.
- Douda J., Doudová J., Drašnarová A., Kuneš P., Hadincová V., Krak K., et al., 2014. Migration patterns of subgenus *Alnus* in Europe since the last glacial maximum: A systematic review. PLoS ONE, 9 (2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088709>
- Emberger L., 1955. Une classification biogéographique des climats. Recueil des Travaux des Laboratoires de Botanique, Géologie et Zoologie (Faculté des Sciences, Montpellier), série Botanique, 7 : 3-43.
- Ennabili A., Ater M., 1996. Flore (Pteridophyta et Spermatophyta) des zones humides du Maroc Méditerranéen : Inventaire et écologie. Acta Botanica Malacitana, 21 : 221-239. <https://doi.org/10.24310/abm.v21i0.8677>
- Fennane M., Ibn Tattou M., 1998. Catalogue des plantes vasculaires rares, menacées ou endémiques du Maroc. Bocconea, 8 : 1-243.
- Fennane M., Ibn Tattou M., 2005. Flore vasculaire du Maroc : Inventaire et chorologie. Vol. 1. Pteridophyta, Gymnospermae, Angiospermae. Travaux de l'Institut scientifique, Rabat, série Botanique, n° 37, vol. 1, 483 p.
- Fennane M., 2017. Éléments pour un Livre rouge de la flore vasculaire du Maroc. Fascicule 4. *Basellaceae - Buxaceae* (Version 1, septembre 2017). Tela-Botanica, 29 p. https://www.tela-botanica.org/wp-content/uploads/2017/09/Tela-Bot_LivreR-FVM_Fasc-4-sept-2017.pdf
- Geary D. N., Rennolls K., Rollinson T. J. D., 1985. Characterizing diameter distributions by the use of the Weibull distribution. Forestry, 58 (1): 57-66. <https://doi.org/10.1093/forestry/58.1.57>
- Hammada S. M., Dakki M., Ibn Tattou A., Ouyahya A., Fennane M., 2002. Catalogue de la flore des zones humides du Maroc. Université Mohammed V-Agdal, Institut scientifique, Bulletin de l'Institut scientifique, 24 : 1-59.
- Havrdová A., Douda J., Krak K., Vít P., Hadincová V., Zákrauský P., et al., 2015. Higher genetic diversity in recolonized areas than in refugia of *Alnus glutinosa* triggered by continent-wide lineage admixture. Molecular Ecology, 24: 4759-4777. <https://doi.org/10.1111/mec.13348>
- Hush D., Scovel C., 2003. Polynomial-time decomposition algorithms for support vector machines. Machine Learning, 51 (1): 51-71. <https://doi.org/10.1023/A:1021877911972>
- Kebezikato A. B., Wala K., Dourma M., Atakpama W., Dimobe K., Pereki H., et al., 2014. Distribution et structure des parcs à *Adansonia digitata* L. (baobab) au Togo (Afrique de l'Ouest). Afrique Science, 10 (2) : 434-449. <https://www.ajol.info/index.php/afsci/article/view/109682>
- Lanly J.-P., 1963. Détermination du taux d'échantillonnage d'un inventaire statistique en fonction de la densité des peuplements à inventorier. Annales de l'École Nationale des Eaux et Forêts et de la Station de Recherches et Expérimentations, 20 (2) : 291-304.
- Lepais O., Muller S. D., Ben Saad-Limam S., Benslama M., Rhazi L., Belouahem-Abed D., et al., 2013. High genetic diversity and distinctiveness of rear-edge climate relicts maintained by ancient tetraploidisation for *Alnus glutinosa*. PLoS ONE, 8 (9). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0075029>

Lionello P., Scarascia L., 2018. The relation between climate change in the Mediterranean region and global warming. *Regional Environmental Change*, 18: 1481-1493. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1290-1>

Mandák B., Krak K., Vít P., Pavlíková Z., Lomonosova M. N., Habibi F., *et al.*, 2016. How genome size variation is linked with evolution within *Chenopodium* sensu lato. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 23: 18-32. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2016.09.004>

MacArthur R. H., Wilson E. O., 1967. *The theory of island biogeography*. Princeton, NJ, USA, Princeton University Press, 224 p.

McVean D. N., 1953. Biological flora of the British isles. *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. *Journal of Ecology*, 41 (2): 447-466. <https://doi.org/10.2307/2257070>

Médail F., Quézel P., 1999. Biodiversity hotspots in the Mediterranean basin: Setting global conservation priorities. *Conservation Biology*, 13 (6): 1510-1513. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1999.98467.x>

Molinas L. M., Oliva M., Caritat A., 1991. Estructura y conocimiento de seis parcelas del alcornoque gerundense. *Studia Oecologica*, 8: 159-170. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=78861>

Newton P. F., Amponsah I. G., 2007. Comparative evaluation of five height-diameter models developed for black spruce and jack pine stand-types in terms of goodness-of-fit, lack-of-fit and predictive ability. *Forest Ecology and Management*, 247 (1): 149-166. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.04.029>

Pachauri R. K., Allen M. R., Barros V. R., Broome J., Cramer W., Christ R., *et al.*, 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*. Geneva, Switzerland, IPCC, 151 p. <https://hdl.handle.net/10013/epic.45156>

Pianka E., 1970. On r- and K-Selection. *The American Naturalist*, 104: 592-597.

Quézel P., 2000. *Réflexions sur l'évolution de la flore et de la végétation au Maghreb méditerranéen*. Paris, France, Ibis Press, 117 p.

Rodríguez-González P. M., Campelo F., Albuquerque A., Rivaes R., Ferreira T., Pereira J. S., 2014. Sensitivity of black alder (*Alnus glutinosa* [L.] Gaertn.) growth to hydrological changes in wetland forests at the rear edge of the species distribution. *Plant Ecology*, 215 (2): 233-245. <https://doi.org/10.1007/s11258-013-0292-9>

Rodríguez-González P. M., Ferreira M. T., Rego P. R., 2004. Northern Ibero-Atlantic wetland woods: Vegetation types and within-stand structure. *Forest Ecology and Management*, 203 (1-3): 261-272. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.07.068>

Rondeux J., 1999. *La mesure des arbres et des peuplements forestiers*. Gembloux, Belgique, Les Presses agronomiques de Gembloux, 521 p.

Simenel R., 2011. Comment domestiquer une forêt sans les hommes ? *Techniques & Culture*, 56 : 224-247. <https://doi.org/10.4000/tc.5918>

Toubal O., Boussehaba A., Toubal A., Samraoui B., 2014. Biodiversité méditerranéenne et changements globaux : cas du complexe de zones humides de Guerbès-Senhadja (Algérie). *Physio-Géo*, 8 : 273-295. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.4217>

UICN, 2012. *Catégories et Critères de la Liste rouge de l'UICN : Version 3.1. 2^e édition*. Gland, Suisse, Cambridge, Royaume-Uni, UICN, 32 p.

Ennoui *et al.* – Contribution des auteurs

Rôle du contributeur	Noms des auteurs
Conceptualisation	M. Ater
Gestion des données	H. Ennoui, A. Sahl
Analyse formelle	H. Ennoui, M. Ater
Acquisition du financement	M. Ater
Enquête et investigation	H. Ennoui, A. Sahl
Méthodologie	H. Ennoui, M. Ater
Gestion de projet	M. Ater, H. Ennoui
Ressources	M. Ater, H. Ennoui
Logiciels	H. Ennoui
Supervision	M. Ater
Validation	M. Ater, H. Ennoui
Visualisation	H. Ennoui
Écriture – Préparation de l'ébauche originale	M. Ater, H. Ennoui, A. Sahl
Écriture – Révision et édition	M. Ater, H. Ennoui

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



DE PANAFIEU J.-B. (SC.), FRANC A. (DES.), 2021. **EXTINCTIONS. LE CRÉPUSCULE DES ESPÈCES.** FRANCE, SUISSE, DELACHAUX ET NIESTLÉ, DARGAUD, 128 P.

Alors que les problématiques environnementales deviennent de plus en plus présentes dans nos vies, Dargaud et les éditions Delachaux et Niestlé ont décidé de mettre en commun leurs savoir-faire respectifs pour proposer des bandes dessinées de vulgarisation scientifique. Portés par des spécialistes reconnus dans leur domaine et des dessinateurs de talent, ces ouvrages ont pour but de transmettre une vision claire et exacte des bouleversements actuels ou à venir, de leurs enjeux écologiques ou sociétaux. Sur une île de l'océan Arctique, les journalistes Emma et Luis vont pendant deux mois suivre une équipe scientifique qui étudie le risque mortel que fait peser le réchauffement climatique sur la faune et la flore. Comment des espèces entières sont-elles amenées à disparaître ? Que dit la science de la sixième extinction de masse que nous vivons aujourd'hui ? Quelles étaient les cinq premières ? Comment se sont-elles produites et dans quel contexte ? Et après nous, le déluge ?... Le biologiste Jean-Baptiste de Panafieu et le dessinateur Alexandre Franc nous offrent une description détaillée de ces phénomènes aussi fascinants qu'inquiétants. Avec humour et précision, ils expliquent la disparition des espèces actuelles et les conséquences de cette sixième extinction. *Résumé adapté de celui de l'éditeur.*

Dargaud, 57, rue Gaston Tessier,
75019 Paris, France.
<https://www.dargaud.com/bd/extinctions-le-crepuscule-des-especes-bda5367290>



SIST P., DOUMENGE C., GOND V., TASSIN J., TRÉBUCHON J.-F., 2021. **VIVRE AVEC LES FORÊTS TROPICALES.** ÉDITIONS MUSEO, CIRAD, 216 P.

Quoi de plus complexe que la forêt tropicale et les relations que les humains tissent avec elle ? Pourtant, ou plutôt pour cette raison, les clichés, les raccourcis, les malentendus et même les contresens foisonnent dans des discours trop volontiers simplistes. L'objectif de ce livre, conçu et rédigé par une équipe de chercheurs, est au contraire, sans jargon ni condescendance, de rendre compte des imbrications respectives entre les humains et les forêts tropicales. Ce n'est qu'en tenant compte de ces interdépendances que l'on peut espérer sauver l'avenir conjoint des humains et des forêts. Aussi ce livre a-t-il pour ambition de pénétrer en forêt avec eux, de ne pas les abandonner en lisière... Les auteurs de cet ouvrage appartiennent à l'unité de recherche Forêts et Sociétés du Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad). Ces chercheurs relèvent de disciplines multiples, de l'écologie à l'anthropologie, et sont familiers des grandes régions forestières tropicales, dont ils connaissent bien les paysages autant que les peuples. L'ouvrage est organisé autour de trois parties traitant des spécificités des trois continents tropicaux (Afrique, Amérique et Asie), précédées d'une présentation générale des forêts tropicales et suivies d'un ensemble de perspectives pour les forêts et les peuples qui y vivent. Nous avons, pour chaque sujet évoqué, choisi de délivrer un message particulier sans tomber dans le piège de l'encyclopédie. *Résumé adapté de celui de l'éditeur.*

Éditions MUSEO, 9, rue des Prunus,
34230 Plaisan, France.
www.museo-editions.com



LANLY J.-P., SOULÈRES O., 2021, **TRAVAILLER AU SERVICE DES FORÊTS TROPICALES. REGARDS CROISÉS DE FORESTIERS.** FRANCE, ASSOCIATION DES FORESTIERS TROPICAUX ET D'AFRIQUE DU NORD, ÉDITIONS L'HARMATTAN, 298 P.

Dans la suite des livres « Vivre et travailler en forêt tropicale » (L'Harmattan, 2016) et « Vivre et travailler en forêt au Maghreb » (L'Harmattan, 2019), cet ouvrage est un recueil de témoignages sur leur vécu professionnel de forestiers d'Afrique, d'Amérique latine et de France ayant travaillé sous les tropiques. Œuvrant dans des institutions et entreprises de gestion et conservation des forêts, pour des parcs nationaux et autres aires protégées, enseignants et chercheurs pour certains, ils ont choisi ces métiers le plus souvent par vocation née parfois dans leur jeune âge. Ils expriment la fierté d'accomplir leur mission de valorisation et de protection de ces écosystèmes forestiers. Ils insistent sur l'engagement sur le long terme d'un tel travail au service des forêts tropicales, mais aussi sur la difficulté à faire partager avec les différentes parties prenantes la gravité des conséquences à plus ou moins long terme de la dégradation de ces ressources forestières. Précédant ces témoignages, la première partie de l'ouvrage est consacrée à la présentation de deux situations d'aménagement forestier, l'une sous les tropiques secs au Niger, l'autre sous les tropiques humides en Guyane française. *Résumé adapté de celui de l'éditeur.*

Éditions L'Harmattan,
5-7, rue de l'École Polytechnique,
Paris, France.
www.editions-harmattan.fr

Application of *BDq* method to complex tropical mixed forest ecosystems in Nigeria

Friday Nwabueze OGANA¹
José Javier GORGOSO-VARELA²
Alfred Ossai ONEFELI³

¹ University of Ibadan
Department of Social and Environmental
Forestry
Ibadan
Nigeria

² University of Santiago de Compostela
Campus de Lugo
Lugo
Spain

³ University of Ibadan
Department of Forest Production
and Products
Ibadan
Nigeria

Auteur correspondant /
Corresponding author:
Friday Nwabueze OGANA –
fn.ogana@ui.edu.ng



Photo 1.
Tropical mixed forest ecosystem in Nigeria.
Photo F. N. Ogana.

Doi : 10.19182/bft2021.349.a36779 – Droit d’auteur © 2021, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 10 décembre 2020 ; date d’acceptation : 5 mai 2021 ; date de publication : 1^{er} septembre 2021.



Licence Creative Commons :
Attribution - 4.0 International.
Attribution-4.0 International (CC BY 4.0)

Citer l'article / To cite the article

Ogana F. N., Gorgoso-Varela J. J., Onefeli A. O., 2021. Application of *BDq* method to complex tropical mixed forest ecosystems in Nigeria. Bois et Forêts des Tropiques, 349 : 37-50. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2021.349.a36779>

RÉSUMÉ

Application de la méthode *BDq* dans les écosystèmes tropicaux à forêt mixte complexe au Nigeria

L'absence de pratiques de gestion et de traitements sylvicoles dans les forêts tropicales mixtes complexes du Nigeria conduit à leur exploitation incontrôlée et au déclin de leur biodiversité. Pour assurer le maintien de la production, de la protection et de la conservation de ces peuplements mixtes complexes, la présente étude propose l'application d'une méthode de sélection, dite méthode *BDq* (*B* : surface terrière ; *D* : diamètre maximal ; *q*-ratio) pour leur gestion. Un essai pilote a porté sur deux strates, comportant 15 parcelles pour la strate 1 et 7 parcelles pour la strate 2, chacune avec une superficie de 0,25 ha. Seuls les arbres avec un diamètre à hauteur de poitrine $D \geq 10,0$ cm ont été pris en compte pour cette étude. La récolte de bois avec la méthode *BDq* a été quantifiée selon l'intensité d'exploitation, avec *B* à 20 m², 25 m² et 30 m²/ha correspondant respectivement à un régime intensif, modéré et peu intense, pour un diamètre *D* à 65 cm. Le *q*-ratio a été calculé pour chacune des parcelles. Les résultats montrent que les trois régimes *BDq* prescrits (intensif, modéré et peu intense) permettent des intensités d'abattage (FI) raisonnables, en pourcentage du volume extrait (V_{ext}) et de la biomasse (W_{ext}). V_{ext} et FI pour la strate 1 varient entre 39,94-62,30 m³/ha et 11,22-18,18 % et entre 30,44-51,33 m³/ha et 10,02-17,57 % pour la strate 2. Pour la biomasse, W_{ext} et FI varient entre 18,46-29,82 t/ha et 9,40-15,95 % pour la strate 1 et entre 14,16-24,82 t/ha et 9,73-17,50 % pour la strate 2. Ces constats indiquent que l'application de la méthode *BDq* dans les forêts tropicales mixtes et complexes du Nigeria permettrait d'obtenir des peuplements intéressants.

Mots-clés : gestion sylvicole à couvert continu, peuplements forestiers naturels, surface terrière résiduelle, traitement sylvicole, bois, distribution de Weibull, Nigeria.

ABSTRACT

Application of the *BDq* method to complex tropical mixed forest ecosystems in Nigeria

The absence of management practice/silvicultural treatments in the complex tropical mixed forests of Nigeria has led to uncontrolled logging in natural forest stands and loss of biodiversity. To sustain production, protection and conservation in these complex tropical mixed stands, this study proposes the application of a selection method – the *BDq* method (*B*: basal area, *D*: maximum diameter, *q*-ratio) to manage these stands. Two strata were used as a pilot test: stratum 1 consisted of 15 plots and stratum 2 of 7 plots, each with an area of 0.25 ha. Only trees with a diameter at breast height (*d*) ≥ 10.0 cm were considered in this study. Harvesting with the *BDq* method was quantified, by setting *B* at 20 m², 25 m² and 30 m²/ha corresponding respectively to heavy, medium and light harvesting regimes. *D* was set at 65 cm and the *q*-ratio was computed for each plot. The results showed that the three *BDq* regimes prescribed (heavy, medium and light) yielded reasonable felling intensities (FI), derived as the percentage of extracted volume (V_{ext}) and biomass (W_{ext}). The V_{ext} and FI for stratum 1 ranged from 39.94-62.30 m³/ha and 11.22-18.18%; the results for stratum 2 were 30.44-51.33 m³/ha and 10.02-17.57%. For biomass, the W_{ext} and FI ranged from 18.46-29.82 t/ha and 9.40-15.95% for stratum 1 and 14.16-24.82 t/ha and 9.73-17.50% for stratum 2. These findings show that applying the *BDq* method to the complex tropical mixed forests of Nigeria would yield attractive stands.

Keywords: continuous cover forestry, natural forest stands, residual basal area, silvicultural treatment, timber, Weibull distribution, Nigeria.

RESUMEN

Aplicación del método *BDq* a los ecosistemas forestales mixtos tropicales complejos de Nigeria

La ausencia de prácticas de gestión y tratamientos silvícolas en los complejos bosques mixtos tropicales de Nigeria ha provocado la tala incontrolada en las masas forestales naturales y la pérdida de biodiversidad. Con el objetivo de favorecer la producción, la protección y la conservación de estas complejas masas mixtas tropicales, este estudio propone la aplicación de un método de selección —el método *BDq* (*B*: área basal, *D*: diámetro máximo, *ratio q*)— para gestionarlas. Se utilizaron dos estratos como prueba piloto: el estrato 1 constaba de 15 parcelas y el estrato 2, de 7 parcelas, cada una con una superficie de 0,25 ha. En este estudio sólo se consideraron los árboles con un diámetro a la altura normal (*D*) $\geq 10,0$ cm. Se cuantificó el aprovechamiento maderero con el método *BDq*, fijando *B* en 20 m²/ha, 25 m²/ha y 30 m²/ha, correspondientes respectivamente a los regímenes de cosecha intensiva, media y ligera. *D* se fijó en 65 cm y se calculó el *ratio q* para cada parcela. Los resultados mostraron que los tres regímenes de *BDq* prescritos (intensivo, medio y ligero) dieron lugar a intensidades de tala (FI) razonables, derivadas del porcentaje de volumen extraído (V_{ext}) y de la biomasa extraída (W_{ext}). El V_{ext} y el FI del estrato 1 obtenidos fueron de 39,94-62,30 m³/ha y 11,22-18,18 %; los resultados del estrato 2 fueron de 30,44-51,33 m³/ha y 10,02-17,57 %. En cuanto a la biomasa, el W_{ext} y el FI obtenidos fueron de 18,46-29,82 t/ha y 9,40-15,95 % para el estrato 1, y 14,16-24,82 t/ha y 9,73-17,50 % para el estrato 2. Estos resultados muestran que la aplicación del método *BDq* a los complejos bosques mixtos tropicales de Nigeria permitiría obtener producciones de masas forestales interesantes.

Palabras clave: silvicultura de cobertura continua, masas forestales naturales, área basal residual, tratamiento silvícola, madera, distribución de Weibull, Nigeria.

Introduction

The tropical rain forest is one of the most diverse biomes of the world (Dupuy *et al.*, 1999; Turner, 2001). It is characterised by multiple species composition and multi-layered structure (Temesgen *et al.*, 2014). Such complex ecosystems provide a wider array of benefits and can address some ecological and environmental issues compared to monoculture stands (Schütz *et al.*, 2012). To sustain production, protection and conservation in the tropical forest ecosystem, there is a need to adopt effective management practice(s). Up to the present time, there is little or no management practice/silvicultural treatments in the complex tropical mixed forests of Nigeria. This is evidence in the uncontrolled exploitation of natural forest stands in the country.

A well-known management system that will ensure the sustainability of production, protection and conservation in the tropical mixed forest stand is Continuous Cover Forestry (CCF). CCF is a management system that is “characterised by selective harvesting and natural regeneration” (Schütz *et al.*, 2012). Its operability is based on certain principles which include: *continuous cover* (avert large clear-felling), *stability* (sustain stable forest structure) and *naturalness* (biodiversity) (Davies *et al.*, 2008). Mason *et al.* (1999) asserted that to ensure continuous cover, trees on stand > 0.25 ha should not be completely harvested. The benefits of managing forest stand under the CCF systems include but not limited to improve ecological resilience, maintain the biodiversity of habitats, enhance the stands capacity to resist climate change, improve carbon sequestration potential, aesthetic and recreational value etc. (Guldin, 2011; von Gadow *et al.*, 2012; Schütz *et al.*, 2012). Despite the importance of the CCF system, the system has not been applied to the forest ecosystems of Nigeria.

The selection method in the CCF systems can best be achieved with the *BDq* method (Guldin, 1991). The “*BDq* method refers to the stand structure that can be uniquely determined for any combination of residual basal area (*B*), maximum retained diameter class (*D*), and negative exponential constant between diameter classes (*q*)” (Guldin, 1991). Under the *BDq* method, the harvest is quantified by specifying values for the residual basal area (*B*), maximum diameter (*D*) and the *q*-factor (*q*). The *B*, *D* and *q* parameters are then used to derive the target (ideal) stand (Graz and von Gadow, 2005; Guldin, 1991). The distribution of the target stand is then compared to the actual stand; and harvest (allowable cut) is prescribed by the difference between the two stands (Guldin, 1991). Harvest is only permitted for those trees that exceed the diameter distribution of the target stand. The *BDq* has been consistently used in the management of uneven-aged stands in different parts of the world (Guldin, 1991; Baker *et al.*, 1996; Cancino and von Gadow, 2002; Graz and von Gadow, 2005; Brzeziecki and Kornat, 2011; Drozdowski *et al.*, 2014; Sharma *et al.*, 2014).

To date, there is neither any proper management system nor silvicultural treatment been carried out in the complex tropical mixed stands in Nigeria. It is expected that the use of the *BDq* method will help to sustain production, protection and conservation in the complex tropical mixed forest ecosystem of the region. Therefore, the main objective of this study is to evaluate the use of *BDq* method in the management of the complex mixed stand in Nigeria.



Photo 2.
Tropical mixed forest ecosystem in Nigeria.
Photo F. N. Ogana.

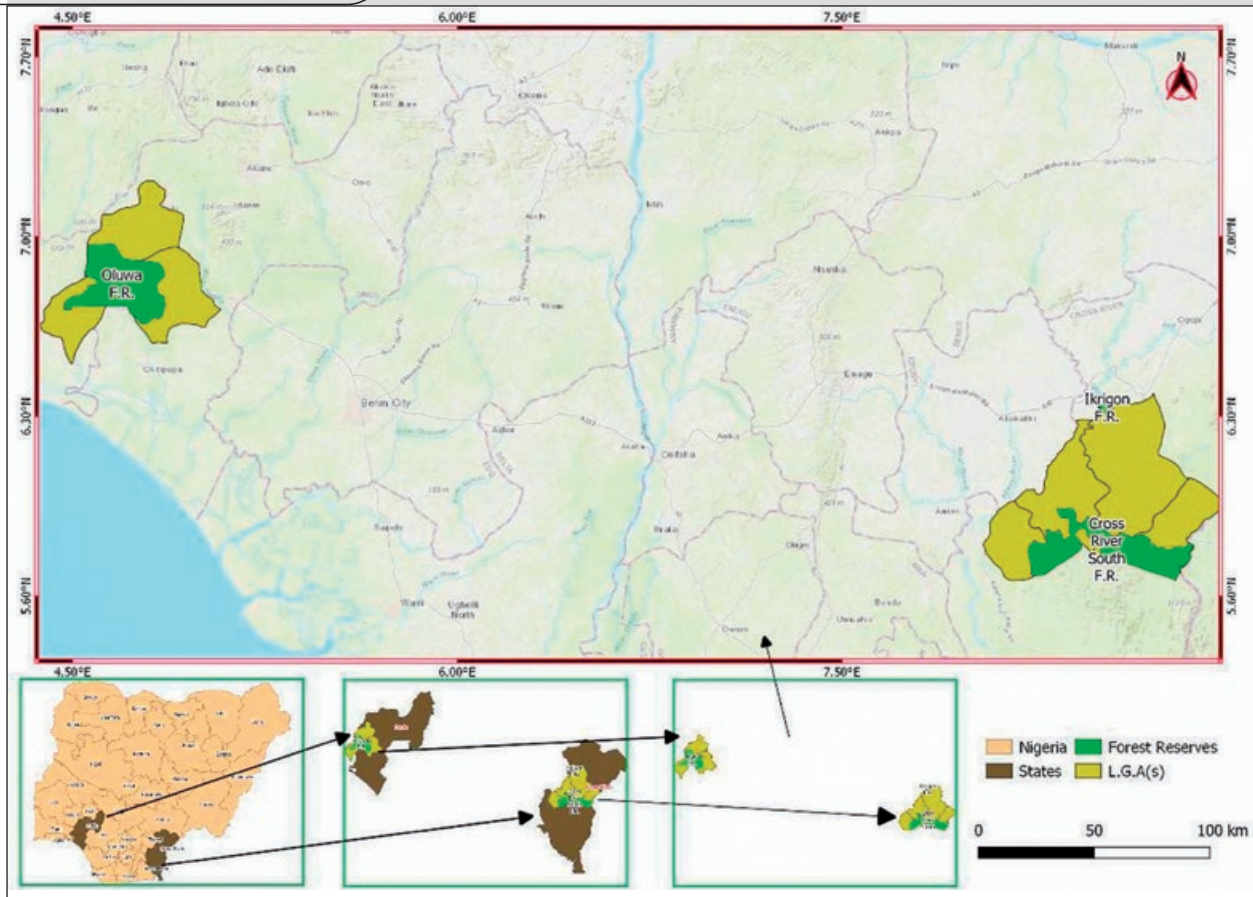


Figure 1.

Location of stratum 1 which consisted of 15 plots systematically demarcated in Ikirigon and Cross River State Forest Reserves (Ikirigon+CRSFR) and stratum 2 comprised of 7 plots demarcated in the natural stand of Oluwa Forest Reserve, Ondo State.

Methodology

Data

The data for the study were collected from two strata located in Cross River State and Ondo State of Nigeria. Both states are within the tropical rain forest zone of the country. Stratum 1 consisted of 15 plots systematically demarcated in Ikirigon and Cross River State Forest Reserves (Ikirigon+CRSFR). Whilst stratum 2 comprised of 7 plots demarcated in the natural stand of Oluwa Forest Reserve, Ondo State (see figure 1). Each plot has an area of 0.25 ha (i.e., 50 m x 50 m). Systematic sampling technique was used for the sample plots. Trees within each plot were identified and enumerated by expert taxonomist to the species level. Flora of West Tropical Africa (Hutchinson *et al.*, 2014) was used for the authentication of the identified species. Only trees with diameter at breast height (d) ≥ 10.0 cm that were considered in this study. Diameters at base and breast of individual tree were measured using a diameter tape while the measurement of tree height was achieved using a vertex. Important stand variables such as the number of trees per ha, basal area per ha, quadratic mean diameter, volume per ha and aboveground biomass in tonnes per ha were computed from the data sets (table I). The individual tree volume was estimated using the volume

equations developed for tropical forest trees in Nigeria by Akindele and LeMay (2006). The pan tropical aboveground biomass equation (Chave *et al.*, 2014) was used to estimate the tree biomass. The biomass function requires diameter, height and wood density as input variables. Wood density of individual tree species was retrieved from the global wood density database (Zanne *et al.*, 2009).

Before the application of the BDq method, the tree species were classified as timber, non-commercial timber and trees for fruits. The BDq method was then applied to the timber species. A list of the commercial timber species is presented in the appendix (tables A.1. and A.2.).

Tree diameter characterisation

Fitting the 3-parameter Weibull function (3P-Weibull)

The 3-parameter Weibull function (3P-Weibull) was used to describe the diameter distribution of the timber species in the complex mixed tropical forest ecosystems. This model is simple and flexible and is more suitable than the 2-parameter Weibull function for describing theoretical uneven-aged (or irregular) truncated stands, namely with a minimum diameter inventory. The probability density function (pdf) and cumulative distribution function (cdf) are expressed as (Gorgoso-Varela and Rojo-Alboreca, 2014):

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x - \gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1} e \left[-\left(\frac{x - \gamma}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad [1]$$

$$F(x) = 1 - e \left[-\left(\frac{x - \gamma}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad [2]$$

where $f(x)$ is the relative frequency of tree; x represents the continuous random variable (i.e., tree diameter); α is the shape parameter ($\alpha > 0$); β represents the scale parameter ($\beta > 0$); γ is the location parameter. Three frequently used methods were used to fit the 3P-Weibull to the individual plot data from both zones: maximum likelihood (ML), moments (MOM) and percentile. A general adjustment was used for all methods by taking the location (γ) as the minimum observed tree diameter in each plot due the suitability of this value for theoretical distributions with “J reversed” shape.

Maximum likelihood (ML) estimation

The ML estimator defined by equations (3) and (4) was used to estimate the shape and scale parameter of the 3P-Weibull. This method was recently used by Gorgoso-Varela *et al.* (2020):

$$\frac{\sum_{i=1}^n (x_i)^\alpha \ln(x_i - \gamma)}{\sum_{i=1}^n (x_i - \gamma)^\alpha} - \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \gamma) \quad [3];$$

$$\beta = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \gamma)^\alpha\right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad [4]$$

where x represents tree diameter and n is the number observation in a plot. The LIFEREG procedure in SAS/STAT™ (SAS Institute Inc., 2004) was used to estimate the shape and scale parameters.

Moments

This method is based on the relationship between the parameters of 3P-Weibull and the first and second diameter moment i.e., arithmetic mean and variance, respectively; expressed as equation (5) and (6). This method was recently used by other researchers (Gorgoso-Varela *et al.*, 2020; Pogoda *et al.*, 2020; Sun *et al.*, 2019):

$$\beta = \frac{\bar{d} - \gamma}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)} \quad [5]$$

$$\sigma^2 = \frac{(\bar{d} - \gamma)^2}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)} \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)\right] \quad [6]$$

where γ represents the location parameter – taken as the smallest diameter of the plot (i.e., 10 cm); \bar{d} is the arithmetic mean diameter; σ^2 is the variance and $\Gamma(\bullet)$ is the gamma function. The bisection iterative procedure (Gerald and Wheatley, 1989) was used to solve equations (5) and (6) in SAS/STAT™ (SAS Institute Inc., 2004).

Percentile

This method is based on the relationship between the parameters of 3P-Weibull and the diameter percentiles. The Dubey (Dubey, 1967) percentile method was used in this study. In this method the scale (β) and shape (α) parameters of the 3P-Weibull function were estimated with the following equations:

$$\beta = P_{63} - \gamma \quad [7];$$

$$\alpha = \frac{\ln \left[\frac{\ln(1-r)}{\ln(1-t)} \right]}{\ln \left[\frac{p_r - \gamma}{p_t - \gamma} \right]} \quad [8]$$

Table I.
Descriptive statistics of the stand variables from the two strata.

Strata	Statistics	N (trees/ha)	G (m ² /ha)	Dg (cm)	V (m ³ /ha)	W (tons/ha)
1 (15 plots)	Mean	282	24.1	32.6	515	238
	SD	78	9.1	3.5	209	71
	Minimum	168	11.0	27.3	195	121
	Maximum	440	40.9	39.6	919	372
2 (7 plots)	Mean	278	19.8	29.9	390	162
	SD	57	6.5	2.4	163	73
	Minimum	200	14.5	27.2	267	98
	Maximum	352	31.7	34.5	711	306

N: number of trees per ha; G: basal area per ha; Dg: quadratic mean diameter; V: volume per ha; W: aboveground biomass; SD: standard deviation.

where P_{63} is the diameter corresponding to the 63rd percentile; γ is location parameter; r is equal 0.97; t is 0.17; p_i and p_i represent the diameters corresponding to the 97th and 17th percentiles, respectively.

Evaluation statistics

The consistency of the 3P-Weibull function fitted with ML, moments and percentile was evaluated with Kolmogorov-Smirnov statistic (D_n), Cramér-von Mises statistic (ω^2), mean square error (MSE) and bias. The smaller value of the evaluation of all statistics indicates a better fit:

$$D_n = \max\{\max_{1 \leq i \leq n_i} [F_n(x_i) - F_0(x_j)], \max_{1 \leq i \leq n_i} [F_0(x_j) - F_n(x_{i-1})]\} \quad [9]$$

$$\omega^2 = \sum_{i=1}^n \left\{ \hat{F}(x_i) - \frac{(i-0.5)}{n} \right\}^2 + \frac{1}{12n} \quad [10]$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (f(x_i) - f_0(x_i))^2}{n} \quad [11]$$

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (f(x_i) - f_0(x_i))}{n} \quad [12]$$

where $F(x)$ and $F_0(x)$ are the observed cumulative frequency distribution and theoretical cumulative frequency distribution, respectively; x_i (in cm) represents the diameter (i ranged from 1 to n); n is the number of observations; $f(x)$ and $f_0(x)$ are the observed and predicted relative frequency of trees, respectively.

The ideal irregular structures and the BD_q method

The diameter distribution of uneven-aged forests can be expressed as (Cancino and von Gadow, 2002):

$$N_i = k_0 e^{-k_1 d_i} \quad [13]$$

where N_i represents the number of trees in i th diameter class; d_i is the diameter class midpoint (in cm); k_0 the intercept and k_1 represents the rate of change.

The constant rate of change between successive diameter class is defined by the quotient (q) (equation [14]). It provides information on the characteristics such as steepness or flatness of the inverse J-shaped distribution (Schütz *et al.*, 2012):

$$q = N_{i+1}/N_i \quad [14]$$

Substituting N_i of equation (13) into equation (14) will give equation (15):

$$q = k_0 e^{-k_1(d_i-w)}/k_0 e^{-k_1 d_i} \quad [15]$$

$$\therefore q = e^{-k_1 w} \quad [16]$$

where w (in cm) is the width of the diameter class. Other parameters are previously defined. From equation (14), N_{i+1} can be defined as: $N_i \times q$. Thus, given a specific value of q and with N_{i+1} known, the number of trees in individual diameter class can be computed (Graz and von Gadow, 2005). This can be achieved with the general expression: $N_i = N_1 \times q^{(i-1)}$ where N_1 is the number of trees in the largest diameter class (Cancino and von Gadow, 2002).

To quantify the available growing stock for the complex mixed tropical stands with a specified residual basal (B , m^2/ha) the following expression that is based on diameter class midpoint (d), was applied:

$$B = K_2 \sum_{i=1}^n N_i \times d_i^2; \text{ where } K_2 = \pi/40000 \quad [17]$$

Substituting $N_i = N_1 \times q^{(i-1)}$ into equation (17) give:

$$B = K_2 \sum_{i=1}^n N_1 \times q^{(i-1)} \times d_i^2 \quad [18];$$

which when rearrange will give:

$$B = N_1 \times K_2 \sum_{i=1}^n q^{(i-1)} \times d_i^2 \equiv N_1 \times K_3; \text{ where } K_3 = K_2 \sum_{i=1}^n q^{(i-1)} \times d_i^2 \quad [19]$$

If $B = N_1 \times K_3$; then $N_1 = B/K_3$. Thus K_3 is also relevant in the computation of the diameter distributions.

Specifying the residual basal area (B , m^2/ha), maximum diameter (D , cm) and q -ratio for the tropical mixed forest

Under the BD_q method, the harvest is often specified first by defining: the residual basal area per ha (B , m^2/ha), maximum diameter (D , cm) and q -ratio (i.e., the quotient). In this study, three BD_q regimes were evaluated for the tropical mixed forests based on the residual basal area (B , m^2/ha). Since there are no previous studies in this region to support the choice of residual basal, B was intuitively set at 20, 25 and 30 m^2/ha corresponding to heavy, medium and light-harvesting regimes, respectively. For beech (*Fagus sylvatica* L.) stands in Central Europe Schütz *et al.* (2016) proposed closely values of 20 and 24 m^2/ha . The proportional residual basal area B corresponding to the managed trees (timber species) was used for the calculations. This is to minimise overexploitation in as much only moderate allowable cut will be possible in the smaller diameter class. Since the minimum harvesting diameter for industrial roundwood is between 30 and 35 cm (Dupuy *et al.*, 1999), the maximum diameter (D) was set at 65 cm for the tropical forest. This is the diameter beyond which it is expected that a tree should not be considered for timber purpose. Such commercial timber trees with diameter $> D$, will be retained under the ecological system called “Green Tree Retention (GTR)” (Vanha-Majamaa and Jalonen, 2001). Other non-timber species such as *Ricinodendron heudelotii* (Baill.) Heckel, *Parkia bicolor* A. Chev., *Diospyros crassiflora* Hiern will also be managed under GTR.

The quotient (q) was computed for each plot from the tropical forest data as the arithmetic mean of the values obtained from two successive diameter classes. A large value (≥ 1.69) will yield a high ratio of small trees to larger ones – implies the production of smaller sawn-timber. Whilst a small value (≤ 1.1) will produce a low ratio of small trees to larger ones – implies the production of larger sawn-timber (Guldin, 1991).

Application of the *BDq*: the felling intensity (FI), volume (V, m³/ha) and biomass (W, tons/ha) to extract

Diameter distribution of the target (i.e., ideal) stand derived was compared by the *BDq* parameters and the actual distribution derived from the inventory data. The difference between the two distributions was used to determine the number of trees per ha to extract from the stand (Guldin, 1991) and the corresponding volume and biomass. To ensure sustainability, the felling intensity (FI) was defined as:

$$FI = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{\sum_{i=1}^n (N_i - N_{(i+1)t}) P_i}{P_t} & ; \text{ if } (N_i - N_{(i+1)t}) > 0 \\ 0 & ; \text{ Otherwise} \end{array} \right\}$$

[20]

where FI is the felling intensity; N_i represents the number of trees per ha in diameter class in actual diameter distribution; $N_{(i+1)t}$ number of trees per ha in diameter class directly higher to i in the target (ideal) diameter distribution; P_i represents the product (i.e., volume or biomass) of diameter class i and P_t represents the total actual products (volume or biomass).

Results and discussion

The descriptive statistics of the estimated location (γ), scale (β) and shape (α) parameters of the Weibull distribution by maximum likelihood, moments and percentiles are presented in table II. The computed Weibull location parameter was the same for all methods because the parameter was taken as the minimum observed diameter per inventory plot. The mean values of the location parameter for stratum 1 (Ikrigon+CRSFR) and stratum 2 (Oluwa FR) were 10.8467 and 10.4428, respectively. This parameter marks the beginning of the diameter distribution. A similar adjustment has been used to achieve good performance with Weibull distribution in the tropical rain forest zone (Ogana *et al.*, 2015; Ogana and Gorgoso-Varela, 2015). The estimated scale and shape parameters varied across the estimation methods. The values of the estimated parameters reflect an ideal structure of all-aged natural forest i.e., inverse J-shaped diameter distributions. Of the three parameters of the Weibull distribution, the shape parameter is the most important with respect to the *BDq* method. This is based on the fact that it determines the shape of the diameter distributions. A value of $\alpha \leq 1$ produces an inverse J-shaped (Vinet and Zhedanov, 2011). The mean values of the shape parameter (α) for stratum 2 were within the limit $\alpha \leq 1$ especially, estimates from moments and percentile methods.

Table II.
 Parameter values for the Weibull distribution fitted using three estimation methods.

Strata	Method	Par.	Mean	SD	Minimum	Maximum
1 (N=15)	ML	γ	10.8467	1.0343	10.0000	14.0000
		β	20.0789	4.1944	14.5138	29.7753
		α	1.2091	0.2410	0.8387	1.8861
	Moment	γ	10.8467	1.0343	10.0000	14.0000
		β	19.4796	4.5537	13.1217	29.7334
		α	1.1856	0.2818	0.8529	1.9288
	Percentile	γ	10.8467	1.0343	10.0000	14.0000
		β	19.9762	5.8586	12.5420	31.3400
		α	1.1210	0.2448	0.7850	1.7595
2 (N=7)	ML	γ	10.4428	0.3047	10.0000	10.9000
		β	14.0344	1.9001	11.6868	17.6960
		α	1.0266	0.0905	0.8854	1.1814
	Moment	γ	10.4428	0.3047	10.0000	10.9000
		β	12.9741	1.9798	10.7358	16.6752
		α	0.9303	0.1489	0.7180	1.1855
	Percentile	γ	10.4428	0.3047	10.0000	10.9000
		β	11.5551	1.9195	9.6640	15.3800
		α	0.9870	0.1188	0.8604	1.1721

Par.: parameter; SD: standard deviation; ML: maximum likelihood.

Table III.

Characterisation of the natural mixed strata considering timber species according to shape parameter α of the Weibull distribution fitted by moments.

Strata	Uneven-aged ($\alpha \leq 1$)	Two-aged ($1 < \alpha \leq 1.35$)	Even-aged ($\alpha > 1.35$)	Total plots
1	6 (40%)	5 (33.3%)	4 (26.7%)	15
2	6 (85.7%)	1 (14.3%)	0 (0%)	7

Table IV.

Mean values of Kolmogorov-Smirnov statistic (D_n), Cramér-von Mises statistic (ω^2), Mean Squared Error (MSE) and bias.

Strata	Method	D_n	ω^2	MSE	bias
1	ML	0.105788	0.096385	0.000332	0.000186
	Moment	0.105100	0.082868	0.000339	0.000173
	Percentile	0.110735	0.147039	0.000324	0.000824
2	ML	0.115378	0.110994	0.000283	0.000262
	Moment	0.121492	0.079650	0.000311	0.000396
	Percentile	0.122601	0.119634	0.000294	0.000610

Characterisation of the natural stand strata considering timber species according to the shape parameter (α) of the Weibull distribution fitted by moments showed that 40% of the plots was classified as uneven-aged ($\alpha \leq 1$), 33.3% as two-aged i.e., “semi-regular” ($1 < \alpha \leq 1.35$) and 26.7% as even-aged ($\alpha > 1.35$) in stratum 1 (Ikriçon+CSFR) (table III). However, in stratum 2 (Oluwa forest FR), 85.7% of the plots were classified as uneven-aged and 14.3% as two-aged. No plot was in the class of even-aged. It is essential to recognise two-aged stands because they could be changed to uneven-aged without considerable alteration of their present structure.

The result of the evaluation statistics showed that the Weibull distribution fitted by maximum likelihood, moments and percentile performed better in the first stratum (Ikriçon+CSFR) compared with the second stratum (Oluwa forest) (table IV). The Weibull distribution fitted by moments had the smallest Kolmogorov-Smirnov (D_n) (0.105100) statistic, Cramér-von Mises statistic (ω^2) (0.082868) and bias (0.000173) in stratum 1 (Ikriçon+CSFR) (table IV). It also presented the smallest Cramér-von Mises statistic (ω^2) (0.079650) in the second stratum. The Weibull distribution fitted with Maximum likelihood performed equally well, especially in the second stratum. The Weibull distribution fitted by percentile produced the poorest fits. The estimation method by moments remains one of the simplest procedures for estimating the parameters of the Weibull distributions. The variance and mean diameter required for

using moments can be disaggregated from a yield table and apply. A parallel study by Sun *et al.* (2019) also reported good fit with the Weibull function fitted by moment for characterising diameter distributions in uneven-aged mixed stands of pine and oak. In Nigeria, Ogana (2020) also observed that using moment-based estimator to fit the Weibull distribution produced results comparable to other complex estimators. The author evaluated ten estimators used for the Weibull distribution in the study.

The line plots of the mean square error statistic describing the fit of the Weibull distribution fitted by ML, moments and percentile across the diameter classes are presented in figures 2 and 3. The line patterns produced by the Weibull distribution fitted by the three methods were the same – characterised by increasing and decreasing behaviour. However, the MSE declined steadily in the larger diameter classes in both strata.

The mean statistics of the q -ratio for the total plots and the uneven-aged plots (i.e., plots considering timber species) in the two strata are shown in table V. The mean values of the q -ratio for the uneven-aged plots in stratum 1 and stratum 2 were 1.479 and 1.487, respectively. The ratio will ensure the sustainable production of both sawn-timber in the mixed stands. Guldin (1991) asserted that a larger “ q -ratio will steepen the ideal (target) distribution, retaining more small trees than larger ones and in consequence, increasing harvesting volume in the mixed stands”. An ideal q -ratio could be intuitively chosen for a stand depending on the economic policy or management goal (Graz and von Gadow, 2005). However, it is more suitable to compute q -ratio for the individual plot, such a procedure will improve accuracy and provide flexibility.

The results of a simulated logging by applying the three regimes of BDq to the two strata in which the maximum diameter (D) was set at 65 cm and q -ratio derived by plot is shown in table VI. The three regimes specified were heavy (20 m²/ha), medium (25 m²/ha) and light (30 m²/ha). For each regime and stratum, the ideal basal area per ha applied ($B_{applied}$) was lower compared with the specification for that regime. The values only correspond to the quantity of timber species in the stratum. Only timber species are managed under the BDq method; whilst some species will be retained as GTR, including non-timber and fruit trees. If a heavy BDq regime is to be considered for the uneven-aged plots in stratum 1, the number of trees per ha to extract (N_{ext}) is 28.56 N/ha with corresponding volume (V_{ext}) and biomass (W_{ext}) of 62.30 m³/ha and 29.82 tons/ha, respectively. The required felling intensities in % volume and biomass of the total of the managed species (Fl_{M}) will be 18.18 and 15.95, respectively. In the case of stratum 2 using heavy BDq regime,

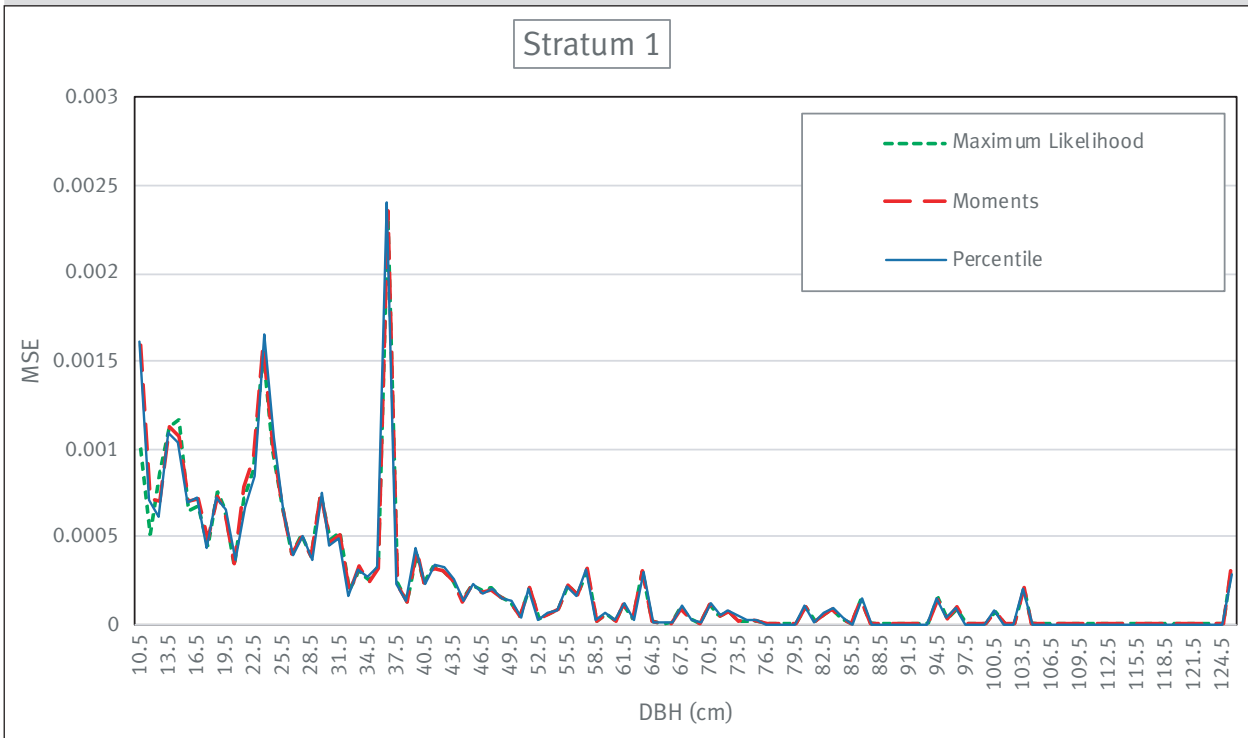


Figure 2. Behaviour of the MSE for the fits by maximum likelihood, moments and percentile in each diameter class for stratum 1.

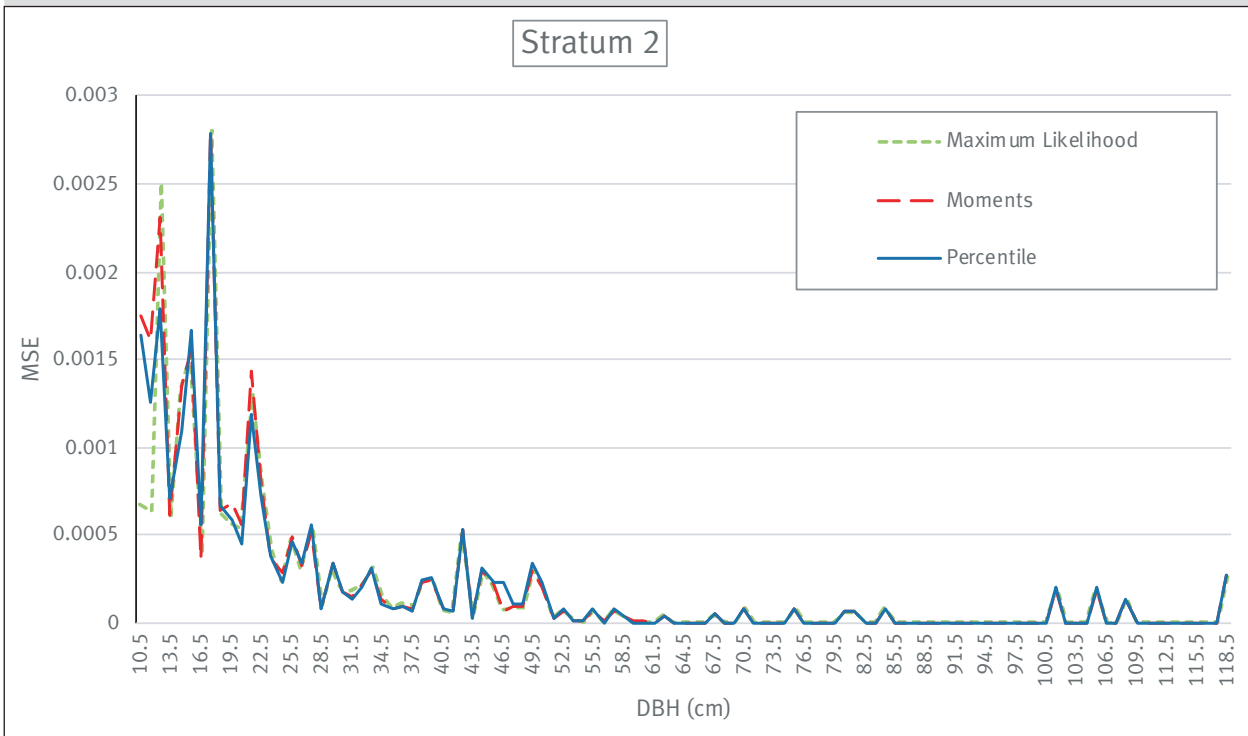


Figure 3. Behaviour of the MSE for the fits by maximum likelihood, moments and percentile in each diameter class for stratum 2.

Table V.

Mean statistics of the q factor for total plots and uneven-aged plots in both strata.

Strata	Mean	SD	Maximum	Minimum
1 (total plots)	1.479	0.150	1.750	1.200
1 (uneven-aged plots)	1.479	0.171	1.678	1.200
2 (total plots)	1.489	0.137	1.778	1.361
2 (uneven-aged plots)	1.487	0.149	1.778	1.361

N_{ext} will equal to 34.60 N/ha and will yield V_{ext} and W_{ext} of 51.33 m³/ha and 24.68 tons/ha, respectively. The FI_M for volume and biomass in the simulated logging will be 17.57 and 17.50, respectively. To our knowledge, this is the first application of the *BDq* method to a complex mixed tropical forest ecosystem, especially in Nigeria.

The graph of the observed and target (ideal) diameter distributions of timber species derived by the applying three regimes of B, with $D = 65$ cm and q computed for each plot in the two strata is presented in figure 4. Four representative plots (2 each from stratum 1 and stratum 2) with the highest density were used. From stratum 1, plot 4 with a q factor = 1.43, harvesting is only possible in diameter classes of 37.5, 47.5 and 52.5 cm. The commercial timber species in those classes are *Cola gigantea* A. Chev., and *Gmelina arborea* Roxb. Other commercial timber species such as *Dialium pachyphyllum* Harms, *Dialium guineense* Willd. could also be harvested in the stratum (plot 6). The commercial timber such as *Albizia perrieri* (Drake) R. Vig., *Azela africana* Sm., *Dialium guineense* Willd., *Milicia excelsa* (Welw.) C.C. Berg and *Pterocarpus santalinoides* DC. with diameter

above D , together with other non-timber species will constitute part of the GTR. Few timber species are available for harvest in stratum 2. Some timber species in the lower diameter class of 22.5 and 27.5 cm could also be harvested for other purposes (e.g. pole) under heavy and medium regimes (treatments) except in stratum 2 plot 1. List of timber species in those classes include *Pterygota bequaertii* De Wild., *Celtis zenkeri* Engl., *Bombax buonopozense* P. Beauv., *Terminalia superba* Engl. & Diels, *Picralima nitida* (Stapf) T. Durand & H. Durand, *Milicia excelsa* (Welw.) C.C. Berg, *Triplochiton scleroxylon* K. Schum., *Malacantha alnifolia* (Baker) Pierre, *Cedrela odorata* L., *Cleistopholis patens* (Benth.) Engl. & Diels, *Antiaris toxicaria* Lesch., and *Hannoa klaineana* Pierre ex Engl.

Adoption of the *BDq* selection method will ensure sustainable management of the mixed stands. And as part of the CCF systems, the method will enhance the stands' capacity to resist climate change, improve carbon sequestration potential, promote better biodiversity of habitats, etc. (Schütz *et al.*, 2012).

Table VI.

Mean values in each stratum after application of three regimes of the *BDq* method for $D = 65$ cm and q calculated by plot.

Strata	Regime	B_{Total} (m ² /ha)	$B_{applied}$ (m ² /ha)	N_{ext} (Pies/ha)	V_{ext} (m ³ /ha)	FI_M (%V)	FI_T (%V)	W_{ext} (tons/ha)	FI_M (%W)
1 (total plots)	Heavy	20	15.52	69.43	190.66	37.19	30.94	82.05	36.53
	Medium	25	19.41	52.94	166.11	31.47	26.20	70.77	30.77
	Light	30	23.29	41.99	147.07	27.15	22.59	62.32	26.47
1 (uneven-aged plots)	Heavy	20	15.52	28.56	62.30	18.18	14.62	29.82	15.95
	Medium	25	19.41	15.55	47.65	13.68	10.98	22.22	11.63
	Light	30	23.29	9.84	39.94	11.22	8.88	18.46	9.40
2 (total plots)	Heavy	20	14.69	30.36	44.74	15.70	11.69	21.56	15.72
	Medium	25	18.37	18.66	33.84	11.34	8.79	15.97	11.14
	Light	30	22.04	12.49	26.09	8.59	6.77	12.14	8.34
2 (uneven-aged plots)	Heavy	20	14.69	34.60	51.33	17.57	13.32	24.68	17.50
	Medium	25	18.37	21.77	39.48	13.23	10.26	18.63	12.99
	Light	30	22.04	14.57	30.44	10.02	7.90	14.16	9.73

B: residual basal area for the commercial managed species; N_{ext} : number of trees to extract; V_{ext} : volume to extract; FI_M : felling intensity in % volume and biomass of the total of the managed species; FI_T : felling intensity in % of the total volume of species in the stratum (timber, non-timber and trees for fruits); W_{ext} : biomass to extract.

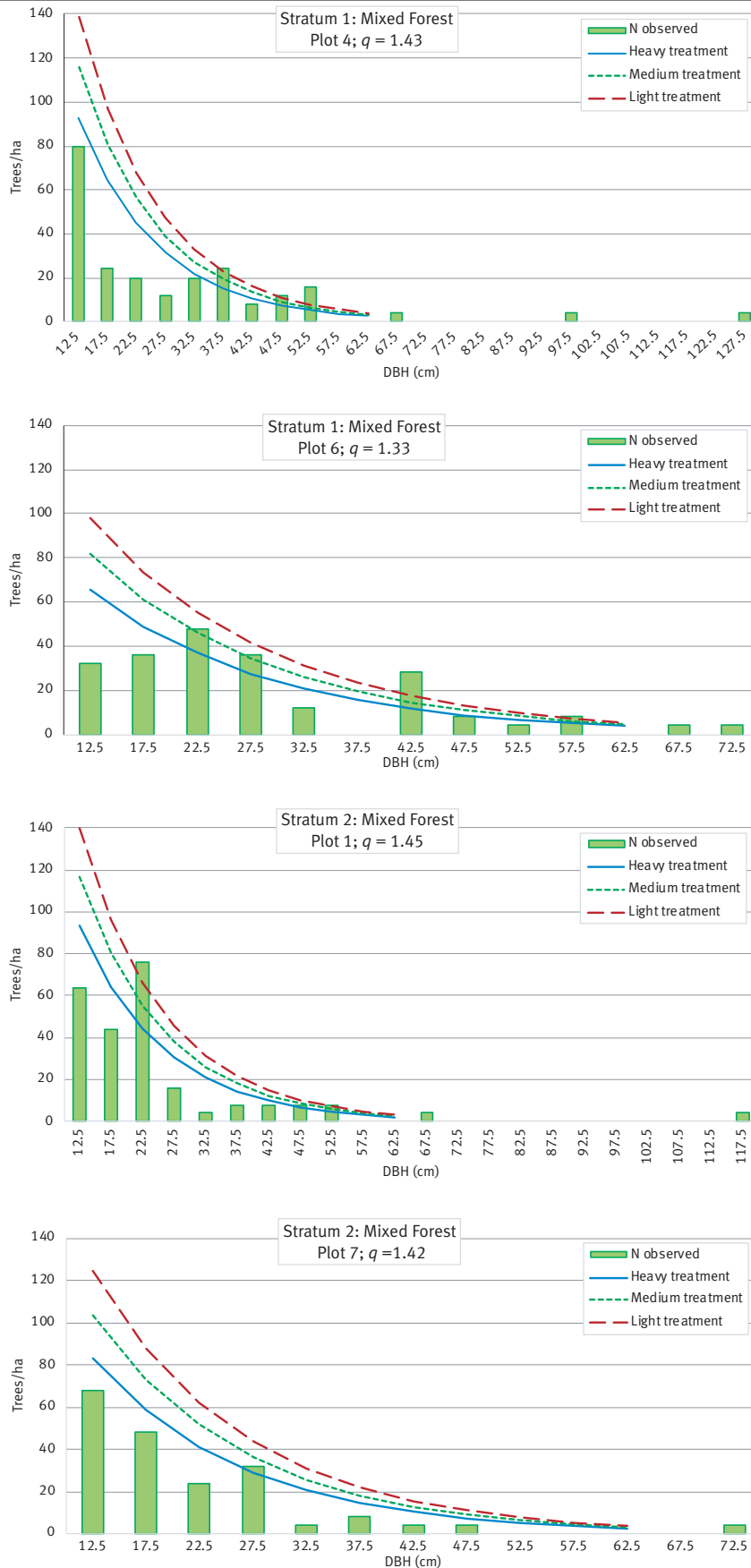


Figure 4. Observed and ideal diameter distributions of timber species derived by applying BDq method for three values of B , $D = 65$ cm and q computed for the individual plots in the two strata.

Appendice

Table A.1.
Commercial timber species in stratum 1.

S/N	Species	S/N	Species	S/N	Species
1	<i>Azelia africana</i>	26	<i>Dialium guineense</i>	51	<i>Pterocarpus mibreadii</i>
2	<i>Albizia gummifera</i>	27	<i>Dialium pachyphyllum</i>	52	<i>Pterocarpus osun</i>
3	<i>Albizia lebbek</i>	28	<i>Distemonanthus benthamianus</i>	53	<i>Pterocarpus santalinoides</i>
4	<i>Albizia perrieri</i>	29	<i>Dracaena mannii</i>	54	<i>Pterocarpus soyauxii</i>
5	<i>Albizia zygia</i>	30	<i>Entandrophragma cylindricum</i>	55	<i>Pterygota macrocarpa</i>
6	<i>Allanblackia floribunda</i>	31	<i>Funtumia africana</i>	56	<i>Pycnanthus angolensis</i>
7	<i>Alstonia boonei</i>	32	<i>Funtumia elastica</i>	57	<i>Spathodea campanulata</i>
8	<i>Anthocleista vogelii</i>	33	<i>Gmelina arborea</i>	58	<i>Staudtia stipitata</i>
9	<i>Antiaris toxicaria</i>	34	<i>Gossweilerodendron balsamiferum</i>	59	<i>Sterculia setigera</i>
10	<i>Baillonella toxisperma</i>	35	<i>Hylodendron gabunense</i>	60	<i>Strombosia pustulata</i>
11	<i>Barteria nigritana</i>	36	<i>Khaya grandifoliola</i>	61	<i>Symphonia globulifera</i>
12	<i>Berlinia confusa</i>	37	<i>Khaya ivorensis</i>	62	<i>Tectona grandis</i>
13	<i>Blighia sapida</i>	38	<i>Klainedoxa gabonensis</i>	63	<i>Terminalia superba</i>
14	<i>Borassus aethiopicum</i>	39	<i>Lannea welwitschii</i>	64	<i>Tetrapleura tetraptera</i>
15	<i>Brachystegia nigerica</i>	40	<i>Lophira alata</i>	65	<i>Treculia obovoidea</i>
16	<i>Carapa procera</i>	41	<i>Lovoa trichilioides</i>	66	<i>Uapaca guineensis</i>
17	<i>Ceiba petandra</i>	42	<i>Margaritaria discoidea</i>	67	<i>Uapaca staudtii</i>
18	<i>Celtis zenkeri</i>	43	<i>Milicia excelsa</i>	68	<i>Xylopia aethiopica</i>
19	<i>Chrysophyllum giganteum</i>	44	<i>Musanga cecropioides</i>	69	<i>Zanthoxylum zanthoxyloides</i>
20	<i>Cleistopholis patens</i>	45	<i>Pausinystalia talbotii</i>		
21	<i>Coelocaryon preussii</i>	46	<i>Pentaclethra macrophylla</i>		
22	<i>Cola gigantea</i>	47	<i>Pentadesma butyracea</i>		
23	<i>Combretodendron macrocarpum</i>	48	<i>Pierreodendron africanum</i>		
24	<i>Cylicodiscus gabunensis</i>	49	<i>Piptadeniastrum africanum</i>		
25	<i>Daniella ogea</i>	50	<i>Pseudospondias microcarpa</i>		

Table A.2.
Commercial timber species in stratum 2.

S/N	Species	S/N	Species
1	<i>Azelia bipindensis</i>	22	<i>Lovoa trichilioides</i>
2	<i>Albizia ferruginea</i>	23	<i>Malacantha alnifolia</i>
3	<i>Anthocleista djalonensis</i>	24	<i>Mansonia altissima</i>
4	<i>Antiaris toxicaria</i>	25	<i>Maranthes robusta</i>
5	<i>Bombax buonopozense</i>	26	<i>Milicia excelsa</i>
6	<i>Brachystegia eurycoma</i>	27	<i>Mitragyna stipulosa</i>
7	<i>Carapa procera</i>	28	<i>Musanga cecropioides</i>
8	<i>Cedrela odorata</i>	29	<i>Nesogordonia papaverifera</i>
9	<i>Ceiba pentandra</i>	30	<i>Pausinystalia talbotii</i>
10	<i>Celtis zenkeri</i>	31	<i>Picalima nitida</i>
11	<i>Cleistopholis patens</i>	32	<i>Pterygota bequaertii</i>
12	<i>Cordia millenii</i>	33	<i>Pterygota macrocarpa</i>
13	<i>Distemonanthus benthamianus</i>	34	<i>Pycnanthus angolensis</i>
14	<i>Entandrophragma angolense</i>	35	<i>Staudtia stipitata</i>
15	<i>Entandrophragma cylindricum</i>	36	<i>Sterculia rhinopetala</i>
16	<i>Ficus mucoso</i>	37	<i>Sterculia tragacantha</i>
17	<i>Funtumia elastica</i>	38	<i>Strombosia pustulata</i>
18	<i>Guarea cedrata</i>	39	<i>Terminalia superba</i>
19	<i>Hannoa klaineana</i>	40	<i>Triplochiton scleroxylon</i>
20	<i>Khaya ivorensis</i>	41	<i>Uapaca heudelotii</i>

Conclusion

This study has successively applied the *BDq* method to the complex mixed tropical forests of Nigeria. Harvest in the stands was defined using three regimes of residual basal area (20, 25 and 30 m²/ha) with desirable felling intensities that would ensure the sustainability of the timber species. The number of trees to extract from the stand and the corresponding volume and aboveground biomass by using the *BDq* method were rational. Commercial timber species with a diameter greater than the 65 cm, together with other non-timber and trees for fruits will comprise the GTR system. Thus, with the adoption of *BDq* method more attractive stand will be produced.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

References

- Akindele S. O., LeMay V. M., 2006. Development of tree volume equations for common timber species in the tropical rain forest area of Nigeria. *Forest Ecology and Management*, 226 (1-3): 41-48. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.01.022>
- Baker J. B., Cain M. D., Guldin J. M., Murphy P. A., Shelton M. G., 1996. Uneven-aged silviculture for the loblolly and short-leaf pine forest cover types. In: General Technical Report Southern Research Station, USDA Forest Service, SO-118: iv, 65 p. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. <https://doi.org/10.2737/so-gtr-118>
- Brzeziecki B., Kornat A., 2011. Application of the *BDq* method in uneven-aged stands silviculture. *Sylvan*, 155 (9): 589-598. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20113395708>
- Cancino J., von Gadow K., 2002. Stem number guide curves for uneven-aged forests development and limitations. In: von Gadow K., Nagel J., Saborowski J. (eds). *Continuous Cover Forestry. Managing Forest Ecosystems*, vol. 4, 163-174. Dordrecht, Netherlands, Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9886-6_13
- Chave J., Réjou-Méchain M., Búrquez A., Chidumayo E., Colgan M. S., Delitti W. B. C., *et al.*, 2014. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20 (10): 3177-3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Davies O., Haufe J., Pommerening A., 2008. *Silvicultural principles of continuous cover forestry: a guide to best practice*. Forestry Commission Wales, England, 111 p.
- Drozdowski S., Bielak K., Buraczyk W., Gawron L., Jaros R., Zybura H., 2014. Silvicultural planning in complex structures of silver fir by means of the *BDq* method in Zagnańsk Forest District. *Sylvan*, 158 (9): 651-660. https://www.researchgate.net/profile/Stanislaw_Drozdowski2/publication/286935815_Silvicultural_planning_in_complex_structures_of_silver_fir_by_means_of_the_BDq_method_in_Zagnansk_Forest_District/links/56715f2408ae0d8b0cc2f0a0.pdf
- Dubey S. D., 1967. Some Percentile Estimators for Weibull Parameters. *Technometrics*, 9 (1): 119-129. <https://doi.org/10.1080/00401706.1967.10490445>
- Dupuy B., Maitre H.-F., Amsallem I., 1999. Tropical forest management techniques: a review of the sustainability of forest management practices in tropical countries. Working Paper, FAO/FPIRS/04. <http://www.fao.org/3/a-x4110e.pdf>
- von Gadow K., Zhang C. Y., Wehenkel C., Pommerening A., Corral-Rivas J., Korol M., *et al.*, 2012. Forest Structure and Diversity. In: Pukkala T., von Gadow K. (eds). *Continuous Cover Forestry. Managing Forest Ecosystems*, vol. 23, 29-83. Dordrecht, Netherlands, Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2202-6_2
- Gerald C. F., Wheatley P. O., 1989. *Applied numerical analysis*. 4th edition. Reading, MA, USA, Addison-Wesley Publishing Co.
- Gorgoso-Varela J. J., Rojo-Alboreca A., 2014. Use of Gumbel and Weibull functions to model extreme values of diameter distributions in forest stands. *Annals of Forest Science*, 71: 741-750. <https://doi.org/10.1007/s13595-014-0369-1>
- Gorgoso-Varela J. J., Ogana F. N., Ige P. O., 2020. A comparison between derivative and numerical optimization methods used for diameter distribution estimation. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 35 (3-4): 156-164. <https://doi.org/10.1080/02827581.2020.1760343>
- Graz F. P., von Gadow K., 2005. Application of a 'stem number guide curve' for sustainable harvest control in the dry woodland savanna of northern Namibia. *Southern African Forestry Journal*, 204 (1): 37-44. <https://doi.org/10.2989/10295920509505225>
- Guldin J. M., 1991. Uneven-aged *BDq* regulation of Sierra Nevada mixed conifers. *Western Journal of Applied Forestry*, 6 (2): 27-32. <https://doi.org/10.1093/wjaf/6.2.27>
- Guldin J. M., 2011. Experience with the selection method in pine stands in the southern United States, with implications for future application. *Forestry*, 84 (5): 539-546. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpr035>
- Hutchinson J., Datzel J. M., Keay R. W. J., Hepper F. N., 2014. *Flora of West Tropical Africa*. Vol.1, Part 2. London, UK, Royal Botanical Gardens, Kew, 330 p.
- Mason B., Kerr G., Simpson J., 1999. What is continuous cover forestry? Forestry Commission Information, Note 29. Forestry Commission, Edinburgh.

- Ogana F. N., 2020. An evaluation of ten estimators for fitting two-parameter weibull function to Nigerian forest stands. *Eurasian Journal of Forest Science*, 8 (2): 129-139. <https://doi.org/10.31195/eiejfs.712992>
- Ogana F. N., Gorgoso-Varela J. J., 2015. Comparison of estimation methods for fitting Weibull distribution to the natural stand of Oluwa forest reserve, Ondo State, Nigeria. *Journal of Research in Forestry, Wildlife and Environment*, 7 (2): 81-90. <https://www.ajol.info/index.php/jrfwe/article/view/125077>
- Ogana F. N., Osho J. S. A., Gorgoso-Varela J. J., 2015. Comparison of beta, gamma Weibull distributions for characterising tree diameter in Oluwa forest reserve, Ondo State, Nigeria. *Journal of Natural Sciences Research*, 5 (4): 28-36. <https://iiste.org/Journals/index.php/JNSR/article/view/20167>
- Pogoda P., Ochał W., Orzeł S., 2020. Performance of Kernel estimator and Johnson S_B function for modeling diameter distribution of black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) stands. *Forests*, 11 (6). <https://doi.org/10.3390/F11060634>
- SAS Institute Inc., 2004. SAS/STAT 9.1 User's Guide (Vol. 1-7). Cary, NC, USA, SAS Institute Inc. [https://www.scpir.org/\(S\(i43dyn45teexjx455qlt3d2q\)\)/reference/References-Papers.aspx?ReferenceID=1625989](https://www.scpir.org/(S(i43dyn45teexjx455qlt3d2q))/reference/References-Papers.aspx?ReferenceID=1625989)
- Schütz J. P., Pukkala T., Donoso P. J., von Gadow K., 2012. Historical emergence and current application of CCF. In: Pukkala T., von Gadow K. (eds). *Continuous Cover Forestry. Managing Forest Ecosystems*, vol. 23, 1-28. Dordrecht, Netherlands, Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2202-6_1
- Schütz J. P., Saniga M., Diaci J., Vrska T., 2016. Comparing close-to-nature silviculture with processes in pristine forest: lessons from Central Europe. *Annals of Forest Science*, 73: 911-921. <https://doi.org/10.1007/s13595-016-0579-9>
- Sharma A., Bohn K., Jose S., Cropper W. P., 2014. Converting even-aged plantations to uneven-aged stand conditions: A simulation analysis of silvicultural regimes with slash pine (*Pinus elliottii* Engelm.). *Forest Science*, 60 (5): 893-906. <https://doi.org/10.5849/forsci.13-097>
- Sun S., Cao Q. V., Cao T., 2019. Characterizing diameter distributions for uneven-aged pine-oak mixed forests in the Qinling Mountains of China. *Forests*, 10 (7): 596. <https://doi.org/10.3390/f10070596>
- Temesgen H., Zhang C. H., Zhao X. H., 2014. Modelling tree height-diameter relationships in multi-species and multi-layered forests: A large observational study from Northeast China. *Forest Ecology and Management*, 316: 78-89. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.07.035>
- Turner I. M., 2001. The Ecology of Trees in the Tropical Rain Forest. In: *The Ecology of Trees*. Cambridge Tropical Biology Series, Cambridge University Press, 298 p. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511542206>
- Vanha-Majamaa I., Jalonon J., 2001. Green tree retention in Fennoscandian forestry. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 16 (1): 79-90. <https://doi.org/10.1080/028275801300004433>

- Vinet L., Zhedanov A., 2011. A “missing” family of classical orthogonal polynomials. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 44: 085201. <https://doi.org/10.1088/1751-8113/44/8/085201>
- Zanne A. E., Lopez-Gonzalez G., Coomes D. A., Ilic J., Jansen S., Lewis S. L., *et al.*, 2009. Data from: Towards a worldwide wood economics spectrum. Global wood density database. Dryad, Dataset. <https://doi.org/10.5061/dryad.234>

Ogana *et al.* – Contribution des auteurs

Rôle du contributeur	Noms des auteurs
Conceptualization	F. N. Ogana
Data Curation	F. N. Ogana
Formal Analysis	J. J. Gorgoso-Varela
Methodology	F. N. Ogana
Resources	A. O. Onefeli
Visualization	F. N. Ogana, J. J. Gorgoso-Varela
Writing – Original Draft Preparation	F. N. Ogana
Writing – Review & Editing	J. J. Gorgoso-Varela, A. O. Onefeli

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

Land use impacts on *Boswellia dalzielii* Hutch., an African frankincense tree in Burkina Faso

Prospère SABO^{1,2}
Amadé OUÉDRAOGO¹
D. S. J. Charlemagne GBEMAVO²
Kolawolé Valère SALAKO²
Romain GLÈLÈ KAKAÏ²

¹ University Joseph Ki-Zerbo
Laboratory of Plant Biology and Ecology
UFR/SVT
03 BP 7021, Ouagadougou 03
Burkina Faso

² Université d'Abomey-Calavi
Faculté des sciences agronomiques
Laboratoire de biomathématiques et
d'estimations forestières
04 BP 1525, Cotonou
Bénin

**Auteur correspondant /
Corresponding author:**
Prospère SABO –
prosperesabo90@yahoo.fr



Photo 1.
Seedling of *Boswellia dalzielii*.
Photo P. Sabo.

Doi : 10.19182/bft2021.349.a31960 – Droit d'auteur © 2021, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 28 novembre 2020 ; date d'acceptation : 25 mai 2021 ; date de publication : 1^{er} septembre 2021.



Licence Creative Commons :
Attribution - 4.0 International.
Attribution-4.0 International (CC BY 4.0)

Citer l'article / To cite the article

Sabo P., Ouédraogo A., Gbemavo D. S. J. C., Salako K. V., Glèlè Kakaï R., 2021. Land use impacts on *Boswellia dalzielii* Hutch., an African frankincense tree in Burkina Faso. Bois et Forêts des Tropiques, 349 : 51-63. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2021.349.a31960>

RÉSUMÉ

Impacts des types d'utilisation des terres sur *Boswellia dalzielii* Hutch., arbre à encens africain au Burkina Faso

Boswellia dalzielii Hutch., arbre à encens africain, est une essence aromatique et médicinale de grande importance socio-économique. Elle est actuellement menacée par une exploitation incontrôlée qui nécessite des mesures pour assurer sa gestion durable. La présente étude a mené une évaluation de la structure des peuplements naturels et de leur régénération selon trois types d'utilisation des terres au Burkina Faso : zones boisées, jachères et champs. L'étude a mis en place 60, 50 et 50 parcelles de 50 m × 20 m, respectivement dans des zones boisées, des jachères et des champs, afin d'y étudier la densité d'arbres adultes (dhp ≥ 5 cm), leur diamètre à hauteur de poitrine (dhp), la hauteur totale et leur état sanitaire. Des données ont également été recueillies sur la régénération : densité (dhp < 5 cm), source (semis naturel, drageon, rejet de souche), hauteur totale et diamètre au collet. Les résultats montrent une hauteur totale similaire (7,0 m-9,0 m) mais un dhp significativement moindre ($p < 0,05$) dans les zones boisées (moyenne ± SD : 20,5 ± 0,49 cm) et les jachères (29,3 ± 0,64 cm) que dans les terres agricoles (32,8 ± 0,15 cm). La densité des arbres adultes (arbres/ha) était 1,3 et 2,7 fois plus élevée en zone boisée (82,37 ± 6,57) que dans les jachères (62,00 ± 3,98) et les terres agricoles (30,02 ± 1,63). La densité de la régénération en zone boisée était 28 et 6 fois supérieure à celle dans les jachères et les terres agricoles, respectivement. La majorité (> 50 %) de la régénération était issue de drageons, aucune régénération par semis n'a été trouvée dans les terres agricoles. La courbe de distribution des arbres selon les classes de diamètre était en forme de J renversé pour les zones boisées, en cloche pour les zones agricoles et en asymétrie positive pour les jachères, ce qui indique des goulets d'étranglement dans le recrutement. Parmi les sujets rencontrés, 80,18 % étaient en mauvais état sanitaire. Les principales menaces pour cette essence sont l'écorçage intensif et les coupes, sans qu'aucune stratégie de conservation ne soit en place dans la zone d'étude. Nous avons proposé des mesures visant à réduire l'intensité de l'écorçage et des coupes, qui devraient contribuer à une meilleure gestion de cette essence.

Mots-clés : pression anthropique, *Boswellia dalzielii*, conservation, structure des peuplements, Burkina Faso.

ABSTRACT

Land use impacts on *Boswellia dalzielii* Hutch., an African frankincense tree in Burkina Faso

Boswellia dalzielii Hutch., an African frankincense tree, is a socio-economically important aromatic and medicinal tree. It is currently threatened by uncontrolled exploitation, and therefore requires action to ensure its sustainable management. This study assessed the population structure and regeneration of its natural stands across three land use types in Burkina Faso: woodlands, fallows and farmlands. Sixty, fifty and fifty 50 m × 20 m plots were established respectively in woodlands, fallows, and farmlands. All the plots were surveyed for adult tree (dbh ≥ 5 cm) density, dbh, total height and health conditions. Data on regeneration density (dbh < 5 cm), source (generative, stem sprouts, suckers), total height and collar diameter were also collected. The results show similar total tree heights (7.0 m-9.0 m) but significantly ($p < 0.05$) smaller tree dbh in woodlands (mean ± SD: 20.5 ± 0.49 cm) and fallows (29.3 ± 0.64 cm) than in farmlands (32.8 ± 0.15 cm). Adult tree density (trees/ha) was 1.3 and 2.7 times higher in woodlands (82.37 ± 6.57) than in fallows (62.00 ± 3.98) and farmlands (30.02 ± 1.63), respectively. The density of regeneration in woodlands was 28 and 6 times higher than in fallows and farmlands, respectively. The majority (> 50%) of regenerating plants were suckers and no seedling regeneration was found in farmlands. The distribution of trees in diameter classes was inverted J-shaped in woodlands, bell-shaped in farmlands and positive asymmetric in fallows, indicating recruitment bottlenecks. We found that 80.18% of individuals encountered were unhealthy. Intensive debarking and cutting were the main threats to the species and no conservation strategy was in place in the study region. We suggest measures to reduce intensive debarking and cutting, which should contribute to better management of the species.

Keywords: anthropogenic pressure, *Boswellia dalzielii*, conservation, population structure, Burkina Faso.

RESUMEN

Impactos del uso de la tierra en *Boswellia dalzielii* Hutch., un árbol de incienso africano en Burkina Faso

La *Boswellia dalzielii* Hutch., olíbano africano, es un árbol aromático y medicinal con importancia socioeconómica. Actualmente está amenazado por una explotación incontrolada, por lo que es necesario actuar para garantizar su gestión sostenible. Este estudio evaluó la estructura de la población y la regeneración de sus masas naturales en tres tipos de uso del suelo en Burkina Faso: bosques, barbechos y tierras de cultivo. Se establecieron sesenta, cincuenta y cincuenta parcelas de 50 m × 20 m respectivamente en bosques, barbechos, y tierras de cultivo. En todas las parcelas se realizó un estudio sobre la densidad de árboles adultos (dbh ≥ 5 cm), el dbh, la altura total y el estado de salud. También se recogieron datos sobre la densidad de regeneración (dbh < 5 cm), el origen (generativo, brotes del fuste, chupones), la altura total y el diámetro del cuello. Los resultados muestran alturas totales de los árboles similares (7,0-9,0 m), pero un dbh de los árboles significativamente menor ($p < 0,05$) en los bosques (media ± DE: 20,5 ± 0,49 cm) y en los barbechos (29,3 ± 0,64 cm) que en las tierras de cultivo (32,8 ± 0,15 cm). La densidad de árboles adultos (árboles/ha) fue 1,3 y 2,7 veces mayor en los bosques (82,37 ± 6,57) que en los barbechos (62,00 ± 3,98) y las tierras de cultivo (30,02 ± 1,63), respectivamente. La densidad de regeneración en los bosques fue 28 y 6 veces mayor que en los barbechos y las tierras de cultivo, respectivamente. La mayoría (> 50 %) de las plantas que se regeneraban eran chupones y no se encontró regeneración por semillas en las tierras de cultivo. La distribución de los árboles en clases diamétricas tenía forma de J en los bosques, de campana en las tierras de cultivo y de asimetría positiva en los barbechos, lo que indica la existencia de cuellos de botella en el reclutamiento. Se constató que el 80,18 % de los individuos encontrados no estaban sanos. El descortezamiento y la tala intensivos son las principales amenazas para la especie, y no existe ninguna estrategia de conservación en la región estudiada. Sugerimos medidas para reducir el descortezamiento y la tala intensivos, lo que debería contribuir a una mejor gestión de la especie.

Palabras clave: presión antropogénica, *Boswellia dalzielii*, conservación, estructura de la población, Burkina Faso.

Introduction

Local people commonly harvest fruits, leaves, flowers, roots, wood, bark and others products from trees for their livelihoods (Gouwakinnou *et al.*, 2011). This can lead to an overexploitation of trees with either single or multiple uses, putting the populations of these species in a regressive dynamic. Threatened populations are characterized either by scarcity, or the absence of small individuals or the decline of breeding trees (Ouédraogo *et al.*, 2006).

Among the important forest resources used in Burkina Faso is *Boswellia dalzielii* Hutch., an African frankincense tree. The species is widespread in the Sahelo-Sudanian savannahs (Arbonnier, 2000), from northern Cameroon to southern Mali, with populations concentrated in Nigeria, Cameroon, Benin, Togo, Ghana, and Burkina Faso (DeCarlo *et al.*, 2019).

Boswellia dalzielii is a plant with high medicinal value in Burkina Faso (Ouédraogo *et al.*, 2006). Its trunk bark decoction is used to treat a plethora of health conditions in both humans and cattle including fever, rheumatism, gastrointestinal disorders (Nacoulma-Ouédraogo, 1996; Ouédraogo *et al.*, 2006). The resins extracted from frankincense trees have been traded at local and international markets for thousands of years (Groom, 1981). They are used for traditional medicine, incense, or industrial purposes (Nussinovitch, 2010). Resin has been and is still used for religious rituals and the traditional coffee ceremony, as well as for yielding volatile oils, which are used in perfumery industry (Leminih and Teketay, 2003).

Despite its widely recognized sociocultural and medicinal potentials, little information is available on the *B. dalzielii* species populations' status in its occurrence regions, particularly in Burkina Faso. Ouédraogo *et al.* (2006) and Ouédraogo and Thiombiano (2012) have examined the pattern of its natural regeneration in eastern Burkina Faso and its abilities of *ex-situ* reproduction by seeds. While it is important to know the status of the species and threats, how exploitation of trees by local people affects the species population is still unclear. Such information is a baseline to engage in a sustainable utilization of the species products and services. Lack of such information is currently hindering the development of conservation strategies and management plans but also a great threat to the species (Bellefontaine *et al.*, 2000).

One of the manifestations of human disturbances on nature, is the change in land uses. Natural vegetation, namely savannahs/woodlands are often burned and converted into farmlands, resulting in a mosaic of landscapes including natural vegetation, farmlands and fallows (Idohou *et al.*, 2016). Understanding how these changes in land use affect the species conditions is essential in designing land use specific recommendations for species management.

Several authors found in East Africa (Ethiopia, Eritrea and Sudan) woodlands that *Boswellia* species have unstable structures (Ogbazghi *et al.*, 2006; Abiyu *et al.*, 2010; Abteu *et al.*, 2012). Bongers *et al.* (2019) concluded that *Boswellia papyrifera* populations are declining. In Cameroon, Kémeuzé *et al.* (2012) showed that *Boswellia dalzielii* populations are threatened. In Burkina Faso, Ouédraogo *et al.* (2006) and Thiombiano *et al.* (2012) also showed that *Boswellia dalzielii* populations are threatened by debarking.

The *Boucle du Mouhoun* region in Burkina Faso benefits from suitable natural conditions that have made it an agricultural production region and it has attracted many immigrants, mainly *Mossi* from more densely populated regions of the country where soils have been impoverished and eroded. The agricultural pressure leads to a rapid conversion of natural savannahs and woodlands into farmlands, resulting in habitat fragmentation and biodiversity loss (Clerici *et al.*, 2007). The negative influence of agricultural land on tree stand and their population structure is linked to improper traditional agriculture practices. Vegetation is often cleared and burned extensively for cropping. As a result, seedlings for regeneration rarely occur and persist in these systems. Several authors have reported that individuals of some agroforestry tree species in younger stages are less numerous in agricultural lands than in unexploited savannahs/woodlands, where younger individuals are more numerous (Schumann *et al.*, 2011; Idohou *et al.*, 2016). Meanwhile, mature trees drop fruit on the ground, which could allow seedling recruitment. The use of fire for land preparation represents a permanent threat to seedlings recruitment on agricultural land, in addition to frequent field clean-ups, and the requirement to have a low density of trees to reduce the competition with crops. However, some adult trees (e.g., usually large and tall ones) are intentionally preserved because of the provision of goods and services like in agroforestry systems (Djossa *et al.*, 2008). Thus, knowledge of structural parameters in the context of land use is an essential ecological requirement to measure the level of use and health of the resources in its biotope (Schumann *et al.*, 2011).

The main objective of this study was to assess the current state of *B. dalzielii* natural stands across three land use types, namely woodlands, fallows, and farmlands. Specifically, the study aims to (i) document the current state of *B. dalzielii*, (ii) investigate land-use activities affecting *B. dalzielii*, (iii) assess the impact of human activities on the regeneration of *B. dalzielii*, and (iv) assess the harvesting intensity and visible damages on the Frankincense trees.

Methods

Study area

This study was carried out in the *Boucle du Mouhoun* Region (figure 1) located in northwestern Burkina Faso (11°27' - 13°42' N and 02°27' - 04°48' E). It covers 34,497 km² area representing 12.6 % of the total surface area of Burkina Faso. The *Boucle du Mouhoun* is divided into six administrative provinces: *Balé*, *Banwa*, *Kossi*, *Mouhoun*, *Nayala* and *Sourou*. Three major sociolinguistic groups dominate the region: *Bwaba*, *Samo* and *Dafing* (RGPH, 2008). The vegetation of the *Boucle du Mouhoun* shows in its northern part (South Sahel sector), a gradient from shrub steppe to tree-lined steppe and in the south, to savannah. In the center (northern Sudanese sector), shrubby and tree-lined savannah dominate. Finally, in the south (southern Sudanese sector), woodlands with gallery forests were noticed along the rivers. The mean annual rainfall ranges between 500 and 1,000 mm and average monthly temperatures range from 23 °C in January to 39 °C in April.

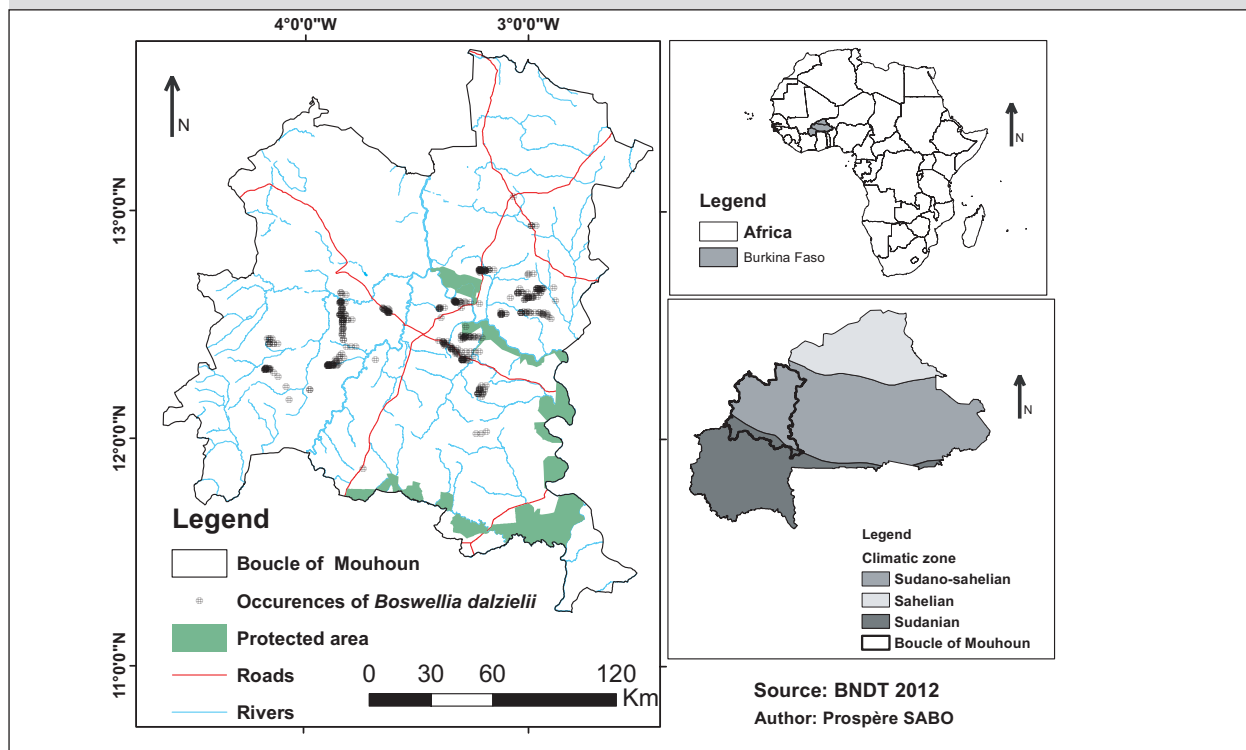


Figure 1.
Map showing the study area.

Study species

Boswellia dalzielii Hutch. (Burceraceae), also known as Frankincense is a medium sized (height 8-15 m) tree with rounded and clear crown, remarkable in the dry season by its yellowish bole (photos 1 & 2). In the study region, trees reached maximum height of 19 m, and a maximum diameter at breast height (dbh) of 77.39 cm. *B. dalzielii* grows in Sudano-Sahelian savannahs with a very marked long dry season (Onana, 1998). The species is often gregarious and grows preferentially on granitic or lateritic scree (Ouédraogo *et al.*, 2006). *B. dalzielii* is native to the tropical regions of Africa (Arbonnier, 2000). It occurs from Côte d'Ivoire to Central Africa (Arbonnier, 2000). The largest populations are found in Burkina Faso, Nigeria and Mali (Emmanuel and Adediji, 2015; DeCarlo *et al.*, 2019). In Burkina Faso, *B. dalzielii* is found from the southern Sahel to southern Sudan (Ouédraogo *et al.*, 2006). In their natural distribution range, trees of the species are threatened because of their overexploitation (Ouédraogo *et al.*, 2006). The life cycle of *B. dalzielii* can be split into seedlings, juvenile trees and adult trees. Seedlings are all individuals with dbh less than 2 cm, individuals between 2-5 cm dbh are considered juvenile while individuals > 5 cm dbh are classified as adults.

Sampling design and data collection

The study area was first explored based on the vegetation and soil map and information from the local populations to confirm the presence of the species. The number N of plots considered per land use type, was computed as follows (Dagnelie, 1998):

$$N = \frac{t_{1-\alpha/2}^2 CV^2}{d^2}$$

In this equation, $t_{1-\alpha/2}$ is the critical value of the t -distribution that converges to the Normal distribution for larger samples ($N > 30$) and equals to 2.04 for a probability value $1-\alpha/2$ ($\alpha = 0.05$); CV is the coefficient of variation of basal area of *B. dalzielii* taken as 61.86% (determined in a pre-inventory of 30 plots); d is the marginal error of the estimation of dendrometric parameters ($d = 10\%$). In total, 160 plots of 50 m × 20 m were randomly established: 50 in farmlands, 50 in fallows and 60 in woodlands, representing human disturbance gradient.

Within each plot, size variables namely dbh and total height were measured on all *B. dalzielii* adult individuals (dbh ≥ 5 cm). In addition to the dendrometric parameters, the health status (healthy – individuals without indices of human exploitation, moderately unhealthy – tree partially damaged and still alive, severely unhealthy – tree severely debarked, logged – tree cut down) of individuals and indices of human activities on individuals were recorded. Within each plot, five quadrat-subplots of 5 m × 5 m were installed



Photos 2.
 Ontogenetic stages of *Boswellia dalzielii*: (a) seedling, (b) juvenile, (c) adult.
 Photos P. Sabo.

in the four corners and in the center to count and measure total height and the collar diameter of seedlings and juveniles. In addition, for each seedling and juvenile, the mechanism of regeneration either from seed, sucker or stem sprout was determined by excavation.

Data analysis

Assessing effect of land use on dendrometric characteristics and density of trees and regenerations of *Boswellia dalzielii*

One-way analysis of variance (ANOVA) (Zar, 1999) was applied on mean diameter, basal area and mean height (table I) to assess impacts of land use types on size characteristics of *B. dalzielii*. Assumptions for ANOVA namely normality and equality of populations' variances were checked before using Ryan-Joiner and Levene tests respectively. When significant land use effect is detected, the Student-Newman and Keuls test was applied to classify the land-use types according to their mean values for each size characteristic. Densities of adults, juveniles and seedlings (table I) were compared using generalized linear models with Poisson error distribution. All these analyses were performed in the R statistical package version 3.5.1 (R Core Team, 2018).

Assessing land use impacts on trees and regeneration size class distribution

Tree diameter values were arranged in 5 cm classes and observed class-wise densities (d_i) were calculated as in the equation below (Bonou *et al.*, 2009):

$$d_i = \frac{n_i}{S_p \times N_p}$$

where d_i is the tree density of class i , n_i is the number of individuals in class i , S_p and N_p are plot size in ha (i.e. 0.1 ha) and the total number of plots per land use, respectively.

The observed size class distributions (based on d_i) were adjusted to the Weibull three-parameter distribution. The probability density function (Johnson and Kotz, 1970) of this distribution is:

$$f(x) = \frac{c}{b} \left(\frac{x-a}{b} \right)^{c-1} \exp \left[- \left(\frac{x-a}{b} \right)^c \right]$$

where x is the tree diameter; a (threshold parameter) = 5 cm; b is the scale parameter linked to the central value of diameters and heights; c is the shape parameter of the structure. Observed data were used to estimate parameters b and c based on the maximum likelihood method. These values were used to establish the theoretical distribution following Glèlè Kakai *et al.* (2016). Log-linear analysis was performed in SAS (2006) to test the adequacy of the observed structure to the Weibull distribution.

Regenerations individuals were grouped into 0.5 m range height classes. Height classes' distribution provides information for better understanding of the potential growth and developmental problems of regenerations (De Steven, 1994).

Impacts of land use on the regeneration mechanisms and health status of *Boswellia dalzielii* individuals

A contingency table showing the number of individuals for each regeneration mechanism was constructed and submitted to a Chi-square test to check whether land use has non-random impacts on the distribution of regeneration mechanism. The same analysis was performed on health status and threats.

Table I.
Population structure and stability parameters.

Parameters	Formula	Definition	References
Tree-density of the stands (N in trees/ha)	$N = \frac{n}{s}$	Average number of trees per plot expressed in trees/ha	Philip, 2002
Mean diameter of trees (D, in cm)	$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i$	Average diameter of all trees found in the stand	
Basal area (G, in m ² /ha)	$G = \frac{\pi}{40000s} \sum_{i=1}^n d_i^2$	Sum of the cross-sectional areas at 1.3 m above ground level of all <i>Boswellia dalzielii</i> trees on a plot	Philip, 2002
Mean height (H, in m)	$H = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i$	Average height of all trees found in the stand	
Mean density of regeneration (individuals/ha)	$N_r = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 dr_i$ with $dr_i = \frac{n_i}{sq}$	Average number of seedlings and juveniles of <i>Boswellia dalzielii</i> per hectare	Poupon, 1970
Recruitment rate (%)	$Tr(\%) = \frac{\text{Individuals } d < 5 \text{ cm}}{\text{Individuals } d \geq 5 \text{ cm}} * 100$	Number of individuals dbh < 5 cm divided by number of individuals dbh ≥ 5 cm	Poupon, 1970

Results

Impacts of land use on dendrometric characteristics and densities of *Boswellia dalzielii*

In total, 1,191 individuals of *B. dalzielii* were recorded in the 160 plots. Among the dendrometric characteristics, only the mean diameter varied significantly ($p < 0.05$) according to land use. Trees were larger in farmlands than in fallows and woodlands. Although not significant, trees were taller in farmlands than in other land use types and basal area was higher in woodlands and fallows than in farmlands (table II). Land use type had significant effect ($p < 0.05$) on densities for all ontogenetic stages (table II). There were more adults, juveniles and seedlings in woodlands than in fallows and farmlands (table II). Adult tree density was 1.31 and 2.72 times higher in woodlands than in fallows and farmlands, respectively (table II). Similarly, density of regeneration (juveniles and seedlings) was 6.20 and 26.76 times higher in woodlands than in fallows and farmlands, respectively (table II). The overall rate of natural regeneration of *B. dalzielii* populations is 25.50% for a total number of 242 regeneration trees. This rate is very low in farmlands (4.66%), low in fallows (17.09%) and in woodlands (37.21%).

Impacts of land use on the size class distributions of tree and regeneration of *Boswellia dalzielii*

The diameter size class distribution of trees (figure 2) showed that the probabilities of the goodness of fit tests were all greater than 0.05 (farmlands: Chi-square = 2.13, $p = 0.790$; fallows: Chi-square = 1.03, $p = 0.910$; and woodlands: Chi-square = 1.05, $p = 0.860$) indicating a good fit of the Weibull distribution to the observed size distributions for all land use types. In the woodlands, the distribution followed a reverse J-shaped with a shape parameter $c < 1$, characterizing a higher proportion of individuals in the smaller diameter classes. This distribution was dominated by individuals of diameter between 5 and 30 cm (figure 2a). In fallows, the distribution was asymmetric positive (figure 2b) characterizing stands with predominance of small individuals. Adult trees between 5 and 40 cm diameter were the most represented. In farmlands, the distribution rather showed a bell-shaped diameter distribution (figure 2c) characterized by a large proportion of individuals in the middle diameter classes and lower proportion of individuals in the smaller and larger diameter classes. Trees of diameter between 20 and 45 cm were the most represented.

The height class distribution of regenerations (seedlings and juveniles) showed that the probabilities of the goodness of fit tests were all greater than 0.05 (Farmlands: Chi-square = 3.41, $p = 0.680$; Fallows: Chi-square = 2.76, $p = 0.831$; and Woodlands: Chi-square = 1.91, $p = 0.783$) indicating a good fit of the Weibull distribution to the observed size distributions for all land-use types. This height class

Table II.

Comparison of the dendrometric parameters of *Boswellia dalzielii* trees according to land use types and soil types: mean (m), standard error (se) and probability values (P) of the ANOVA and GLM.

Land use types/ Soil types	Mean diameter (D, cm)		Mean height (H, m)		Basal area (G, m ² /ha)		Density (N, stems/ha)					
							Adults		Juveniles		Seedlings	
	m	se	m	se	m	se	m	se	m	se	m	se
Woodland (60)	20.5 ^a	0.49	7.0 ^a	0.11	3.5 ^a	0.24	82.3 ^a	6.57	27.3 ^a	5.82	171.3 ^a	29.83
Fallow (50)	29.3 ^b	0.64	8.9 ^a	2.01	3.6 ^a	0.25	62.0 ^b	3.98	6.0 ^b	2.92	27.6 ^b	12.84
Farmlands (50)	32.8 ^c	0.96	8.8 ^a	0.14	2.8 ^a	0.28	30.0 ^c	1.63	1.0 ^c	0.71	6.4 ^c	3.68
F/Chi-square	17.07		2.51		2.37		1349.90		1842.90		1623.90	
p-value	<0.001		0.08		0.09		<0.001		<0.001		<0.001	

Statistic tests (F for ANOVA, and Chi-square for Poisson GLM). Means followed by the same letter in the same column are not significantly different at Prob. = 0.05 (Student-Newman-Keuls test). m: mean; se: standard error; p-value: probability.

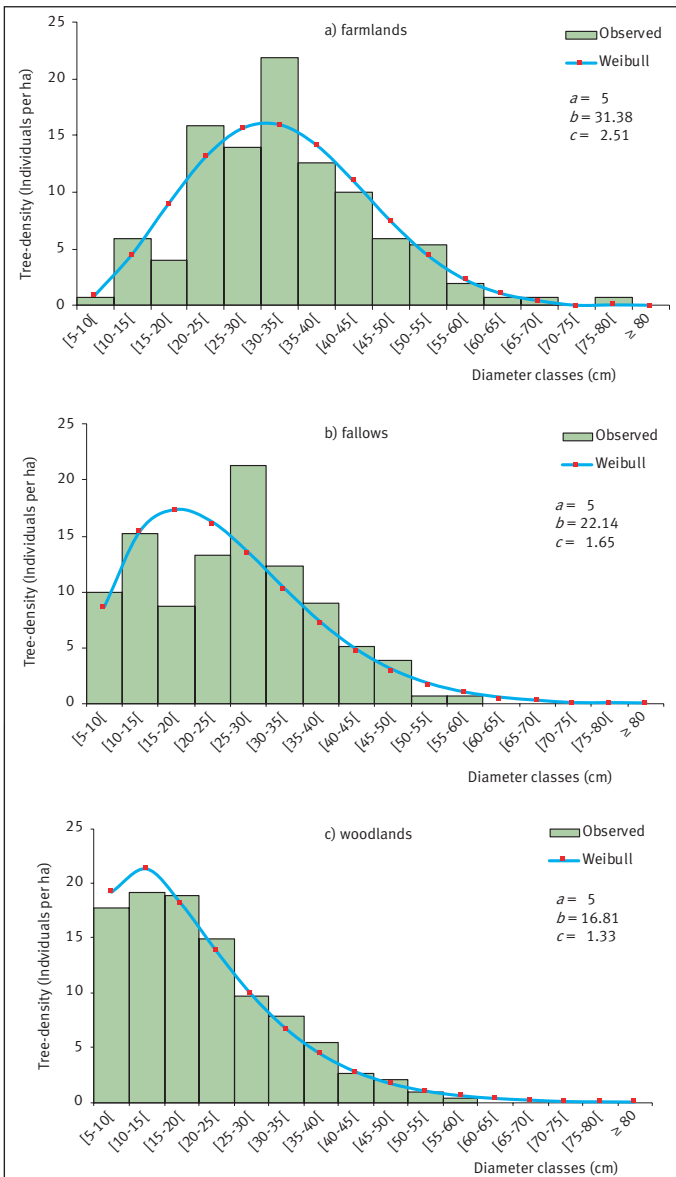


Figure 2. Stem diameter structures of *Boswellia dalzielii* in three land-use types: a) farmlands, b) fallows, c) woodlands.

distribution of regenerations in all land use types showed a reverse-J shape, with a shape parameter $c < 1$. Individuals of total height between 0 and 0.5 m were the most abundant (figure 3). Individuals in other height classes were rare (figure 3).

Impacts of land use on the regeneration mechanisms and health status of *Boswellia dalzielii* individuals

Tree regeneration (seedlings and juveniles) mechanisms including suckers, stem sprouts, and seedlings (photos 3) were identified and their occurrence differed significantly across land use types ($p < 0.001$, table III). *B. dalzielii* reproduces mainly through asexual routes (sucker and stem sprouts). Irrespective of the land use types, more than half of regeneration individuals were from suckers and this proportion was higher in farmlands followed by woodlands and fallows. Stem sprouts were mostly found in fallows. Regeneration from seeds were mostly found in woodlands followed by fallows but not in farmlands (table III).

Concerning the health status of *B. dalzielii* individuals (photos 4), there was also significant variation among land use types ($p < 0.001$, table III). Out of a total of 949 identified individuals, 80.18% had indices of human exploitation. More than half of individuals were severely unhealthy in farmlands and fallows. Woodlands were dominated by healthy or moderately healthy individuals, although the proportion of logged and severely unhealthy trees was about 40%. There were more logged trees in woodlands than in other land use types (table III).

With regards to threats to individuals of *B. dalzielii*, cutting, fires, wind and especially the intense debarking were noted (photos 5). Individuals were severely debarked and often have dead parts (branches or trunk) in all land use types. This observation was very pronounced in farmlands and fallows (table III). On the other hand, indices of bush fires and cutting were noted mainly in woodlands.

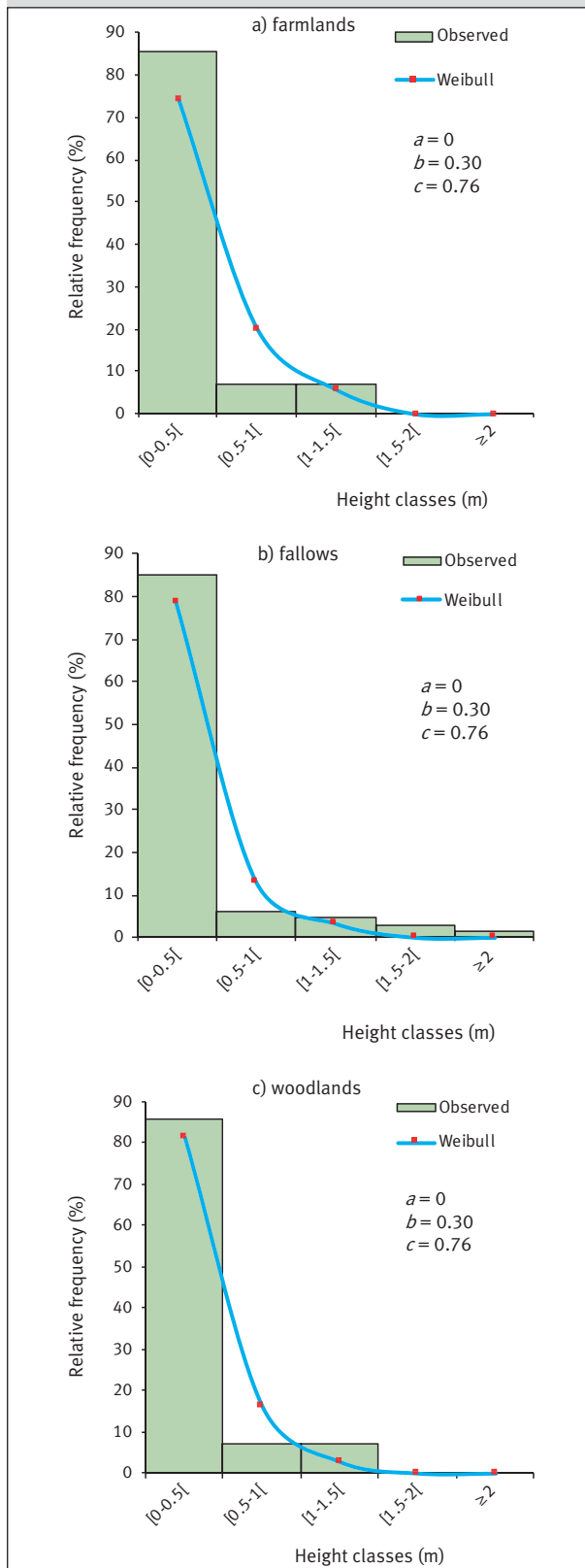


Figure 3. Stem height distribution of regeneration in three land-use types: a) farmlands, b) fallows, c) woodlands.

Discussion

This study examined the population structure of *B. dalzielii* in relation to land use type. Our results indicated a higher abundance of adult trees in the woodlands than in fallows and farmlands. Similarly, density of regeneration (juveniles and seedlings) was higher in woodlands than in fallows and farmlands. There was a marked difference in the population size class of the Frankincense according to land uses. Concerning, the size class distribution of regenerations height, all land use types showed the same distribution type (reverse-) shape. Irrespective of the land use types, more than half of regenerations were from suckers. Regenerations from seeds were very scarce. Concerning the health status of *B. dalzielii* individuals, farmlands individuals were more exploited than fallows and woodlands' individuals.

Land use impacts on the dendrometric parameters of *Boswellia dalzielii* populations

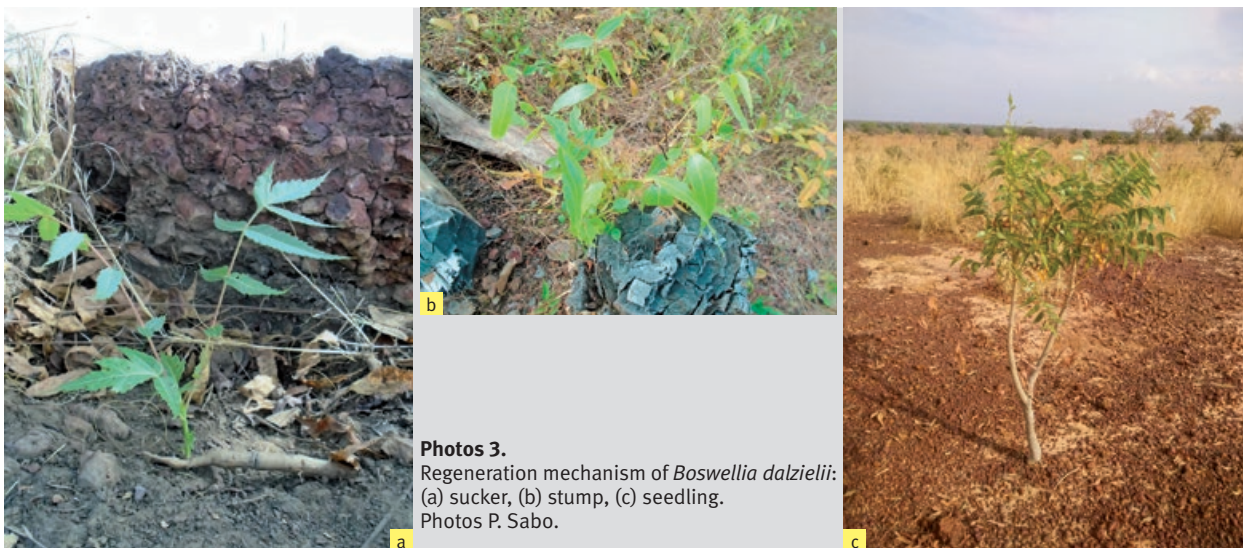
The lack of differences in height of *B. dalzielii* across the three land use types may suggest lack of strong competition for light in the species natural habitats. Indeed, all three land use types are open plant formations. Competition for light has been shown as a key driver of tree size in height in dense vegetation stands (Monzeglio and Stoll, 2008). The largest trees are found in the farmlands compared to fallows and woodlands. In recognition of the medicinal importance of the Frankincense (Ouédraogo *et al.*, 2006), many farmers preserve largest individuals during crop land clearing for the debarking. In addition, these individuals benefit from certain agricultural practices such as weeding and fertilization for their growth (Gouwakinnou *et al.*, 2009; Bazié *et al.*, 2019). The higher density in woodlands compared to fallows and farmlands can be explained by the fact that adult trees of *B. dalzielii* are associated to agriculture in the farmlands. As such it becomes difficult to cultivate annual crops with a high density of trees on farms. Several authors have shown that agricultural land use affects species density (Schumann *et al.*, 2011; Idohou *et al.*, 2016). The higher density in fallows compared to farmlands is due to the gradual recovery of vegetation. Concerning the regeneration, in farmlands, agricultural practices such as plowing, weeding and hilling do not favor the emergence of seedlings or their transition and therefore juveniles. The low density of juveniles in fallows compared to woodlands could be justified by the fact that the vegetation is not completely reconstituted yet. In the Sahel region, the decrease of the practice of fallowing reported by Hänke *et al.* (2016) will undoubtedly compromise vegetation structure, especially for *B. dalzielii* in long term. We conclude that cultivation of crops both reduce seedling regeneration, and may contribute to the lack of small individuals. Similar previous findings indicate that individuals of some agroforestry tree species in small diameter classes occurred at lower density in farmlands when compared to fallows and woodlands, where individuals of smaller diameter classes were numerous (Kelly *et al.*, 2004; Ky-Dembele *et al.*, 2019). In addition, the study

Table III.
 Distribution of regeneration mechanism, health status and threats of *Boswellia dalzielii* across land use types.

Variables/levels	Farmlands	Fallowes	Woodlands	Chi-square test statistics
Regeneration mechanism of <i>Boswellia dalzielii</i> (%) (102 trees)				
Generative	00.00	14.28	18.87	Chi-square = 53.37 Df = 4 $p < 0.001$
Stump sprouting	14.29	28.57	5.67	
Sucker	85.71	57.14	75.49	
Total trees	7	42	53	
Health status of <i>Boswellia dalzielii</i> (%) (952 trees)				
Healthy	6.62	17.1	35.64	Chi-square = 53.15 Df = 6 $p < 0.001$
Moderate	24.5	22.9	17.31	
Severe	63.58	54.19	27.7	
Logged	5.3	5.81	19.35	
Total trees	151	310	491	
Threats leading to death of <i>Boswellia dalzielii</i> (%) (63 trees)				
Debarking	57.15	50	18.75	Chi-square = 164.96 Df = 6 $p < 0.001$
Wind	0	12.5	4.17	
Fire	14.28	12.5	18.75	
Cutting	28.57	25	58.33	
Total	7	8	48	

area has a high agricultural potential in Burkina Faso, and is subject to rapid expansion of agricultural lands. The expansion of cultivated areas is a source of degradation of woodlands area and one of the most important cause of the loss of natural habitats (Charters *et al.*, 2019). Several species of Frankincense trees such as *Boswellia papyrifera* are threatened due to woodland conversion in Ethiopia and Sudan (Abiyu *et al.*, 2010; Abteu *et al.*, 2012). Ogbazghi *et al.*, (2006) through their study of *Boswellia papyrifera* in Eritrea concluded that land use intensity, especially agriculture had a profound negative effect on tree abundance.

Our results showed that the diameter class distribution of adults Frankincense in woodlands and fallows mainly comprised individuals with small diameter compared to farmlands and suggest a relatively stable population structure, particularly in woodlands and highlights to what extent human activities resulting from change in land use may affect the conservation of a species (Ky-Dembele *et al.*, 2019). The low proportion of individuals in the dbh class 5-20 cm in farmlands suggest a difficulty of recruitment of individuals of this lower diameter class to the next ones suggesting the removal of new plants of *B. dalzielii* while farming. This might



Photos 3.
 Regeneration mechanism of *Boswellia dalzielii*:
 (a) sucker, (b) stump, (c) seedling.
 Photos P. Sabo.



Photos 4.
Health status of *Boswellia dalzielii*: (a) healthy, (b) moderately, (c) severely, (d) logged.
Photos P. Sabo.

be also due to the combined effects of human impact such as land clearing for agriculture, livestock grazing and/or harvesting of fodder and harvesting of medicinal products. As for regeneration, we also found their majority (78%) was in the height class of 0-0.5 m in all land-types. Admittedly, this stock of individuals constitutes a regeneration potential for *B. dalzielii* but it is not a guarantee of successful renewing of population, as previously pointed for this species and for other dryland species such as *Boswellia papyrifera* and *Pterocarpus erinaceus* by Alemu (2012) and Ouedraogo *et al.* (2012). This low-energy class is known to be very sensitive to environmental factors such as fire and drought (Vieira and Scariot, 2006). Actually, Gijssbers *et al.* (1994) showed that the density of seedlings is high at the beginning of the

rainy season but drops considerably in the dry season, a period characterized by occurrence of fires and drought in semi-arid area. This situation makes the survival of juveniles unpredictable because of complex interactions among soil, climatic conditions and regeneration mechanisms including seeds in seed banks and those dispersed into a site as well as stump sprouting. For example, in woodlands where the highest density of seedlings occurred, the transition rate of seedlings to juveniles is only 8.69%. Vieira and Scariot (2006) have shown that individuals of size 0.9-1.2 and 1.2-1.5 mark a stage of survival and significant growth in the renewal of stands. The low proportion of individuals in these classes in the different land use types thus indicates a major concern of erosion of the population (Bationo *et al.*, 2001).



Photos 5.
Threats to *Boswellia dalzielii*: (a) debarking, (b) fire, (c) wind, (d) logging.
Photos P. Sabo.

Others studies have consistently reported the decline of the population of *Boswellia papyrifera* due to lack of regeneration (Ogbazghi, 2001; Bongers *et al.*, 2019). Nevertheless, *B. dalzielii* seems to have developed a survival strategy though reduction of growth and devoting higher energy to the development of a hypertrophied root that contains significant food and energy reserves (Ouédraogo *et al.*, 2006). Seedlings can lose their aerial part by drying out or following an accident (fire, grazing) and survive as geophytes during the dry season. The regrowths of the next rainy season are then more vigorous than those of the previous year (Ouédraogo *et al.*, 2006).

Land use impacts on the regeneration mechanisms and health status of *Boswellia dalzielii* individuals

Suckering is the most abundant regeneration mechanism in the three land use types suggesting a possible adaptation of the species to different biotic and abiotic stressors but at the same time suggest that individuals from seeds have relatively lower resistance to drought, fire, improper agricultural practices and livestock grazing. Indeed, suckering is a survival strategy that some species develop to compensate for the limitation of sexual reproduction in disturbed areas (Bellefontaine *et al.*, 2000). According to Setterfield (2002), fire encourages vegetative propagation of species and indicates that regeneration reliant to sexual reproduction is disadvantaged by frequent fire. In addition, in view of the seed properties of *Boswellia dalzielii*, such as absence of seed dormancy and the production of non-viable and embryo-lacking seed (Ouédraogo *et al.*, 2006), regeneration from root suckers remains the most appropriate way for the reproduction of the species. In the Horn of Africa, Ogbazghi (2001) and Eshete (2002) have also observed this mode of reproduction for *Boswellia papyrifera*. Unfortunately, vegetative propagation (sucker and stump) is not favorable to natural conservation of species, even if it contributes to short-term population maintenance, because the lack of sexual recruits will limit the input of genetic variation (Setterfield, 2002).

Nevertheless, vegetative propagation also has the advantage of being less water-intensive and ensuring rapid seedling growth (Bellefontaine *et al.*, 2000). The use of mechanical means in the farmlands often results in root notches that cause seedlings to appear in these areas.

The high proportions of harvested *B. dalzielii* trees show that this species is used and particularly appreciated by local populations as medicine as previously reported (Nacoulma-Ouédraogo, 1996; Ouédraogo *et al.*, 2006; Kémeuzé *et al.*, 2012). The harvesting patterns across the three land use types showed that the species is severely over-exploited in all land use types due to bark harvesting combined with agricultural practices. However, harvesting disrupts the tree physiological functioning and stimulates a higher hormonal activity in order to close the wound quickly (Thiombiano *et al.*, 2003). Several studies have shown the negative effect of debarking by tapping on *Boswellia* species (Ogbazghi, 2001; Rijkers *et al.*, 2006) leading to a declining population trend (Bongers *et al.*, 2019).

Implications for the management of *Boswellia dalzielii*

The present study investigated the land use impacts on the size characteristics, stand structure and regeneration of *B. dalzielii* in the Sudano-Sahelian region of Burkina Faso. Our analysis provides evidence that human disturbances contribute to unstable stands of *B. dalzielii*. In addition, excessive debarking, fire and wind prevent good recruitment despite a fairly high seedling density in woodlands. It is therefore important to carry out assisted natural regeneration in order to allow a better transition between the stages in order to have a stable population in the medium term. To do this, actions such as the establishment of firewalls will be necessary. Also, agricultural practices that maintain a sufficient number of individuals can significantly contribute to the persistence of *B. dalzielii* in agroforestry systems. The bark is the most sought part in the species, limiting the harvesting rate and promoting best harvest practices can also contribute to a better management of the species.

Conclusion

Analysis of the status of *B. dalzielii* stands revealed that they are unstable in the farmlands, unstable in fallow and stable in woodlands. Natural regeneration is slow and weak. Drought and fires prevent the establishment of seedlings growing during the rainy season and their transition from juvenile to adult stage. Overall, this study contributed to new information about the stands structure of *B. dalzielii*. However, long-term studies monitoring of harvested and non-harvested populations will provide better insights and refine management actions. Meanwhile, it is urgent to increase the reforestation and awareness activities of the populations concerned in the conservation of plant biodiversity in the fragile and unstable studied stands.

Acknowledgement

The authors would like to thank the Islamic Development Bank (IDB) and Aromatic Plant Research Center (APRC) for its financial support. They also thank the guides for their kind assistance in data collection. The authors declare that they have no conflict of interest.

References

- Abiyu A., Bongers F., Eshete A., Gebrehiwot K., Kindu M., Lemenih M., *et al.*, 2010. Incense woodlands in Ethiopia and Eritrea: regeneration problems and restoration possibilities. In: Bongers F., Tennigkeit T. (eds). Degraded forests in Eastern Africa: management and restoration. London, UK, Earth Scan, 133-152. https://www.researchgate.net/publication/285743882_Incense_woodlands_in_Ethiopia_and_Eritrea_regeneration_problems_and_restorations_possibilities/link/5678f0fd08aebcdda0ecaf13/download
- Abteu A. A., Pretzsch J., Mohamoud T. E.-S., Adam Y. O., 2012. Population status of *Boswellia papyrifera* (Del.) Hochst in the dry woodlands of Nuba Mountains, South Kordofan State, Sudan. Agriculture and Forestry, 54 (1/4): 41-50. <http://89.188.43.75/agricultforest/old/20120514-03Alemuetal.pdf>

- Alemu B. Y., 2012. Carbon stock potentials of woodlands and land use and land cover changes in north western lowlands of Ethiopia. MSc thesis, Hawassa University, Ethiopia, 129 p. <https://hdl.handle.net/10568/25151>
- Arbonnier M., 2000. Arbres, arbustes et lianes des zones sèches d'Afrique de l'Ouest. Cirad/MNHN/UICN, France, 541 p.
- Bationo B. A., Ouédraogo S. J., Guinko S., 2001. Stratégies de régénération naturelle de *Detarium microcarpum* Guill. et Perr. dans la forêt classée de Nazinon (Burkina Faso). *Fruits*, 56 : 271-285. <https://doi.org/10.1051/fruits:2001129>
- Bazié P., Ky-Dembele C., Jourdan C., Rounsard O., Zombré G., Bayala J., 2019. Synchrony in the phenologies of fine roots and leaves of *Vitellaria paradoxa* in different land uses of Burkina Faso. *Agroforestry Systems*, 93 (2): 449-460. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0135-0>
- Bellefontaine R., Edelin C., Ichaou A., Du Laurens D., Monsarrat A., Loquai C., 2000. Le drageonnage, alternative aux semis et aux plantations de ligneux dans les zones semi-arides : protocole de recherches. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 11 (4) : 221-226. https://www.jle.com/fr/revues/sec/e-docs/le_drageonnage_alternative_aux_semis_et_aux_plantations_de_ligneux_dans_les_zones_semi_arides_protocole_de_recherches_230087/article.phtml
- Bongers F., Groenendijk P., Bekele T., Birhane E., Damtew A., Decuyper M., et al., 2019. Frankincense in peril. *Nature Sustainability*, 2 (7): 602-610. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0322-2>
- Bonou W., Glèlè Kakaï R., Assogbadjo A. E., Fonton H. N., Sinsin B., 2009. Characterisation of *Azelia africana* Sm. habitat in the Lama Forest reserve of Benin. *Forest Ecology and Management*, 258: 1084-1092. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.05.032>
- Charters L. J., Aplin P., Marston C. G., Padfield R., Rengasamy N., Bin Dahalan M. P., et al., 2019. Peat swamp forest conservation withstands pervasive land conversion to oil palm plantation in North Selangor, Malaysia. *International Journal of Remote Sensing*, 40 (19): 7409-7438. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1574996>
- Clerici N., Bodini A. H., Eva A., Grégoire J.-M., Dulieu D., Paolini C., 2007. Increased isolation of two Biosphere Reserves and surrounding protected areas (WAP ecological complex, West Africa). *Journal of Nature Conservation*, 15: 26-40. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2006.08.003>
- Dagnelie P., 1998. Statistiques théoriques et appliquées. Statistique descriptive et bases de l'inférence statistique. Bruxelles, Belgique, De Boeck, 508 p.
- De Steven D., 1994. Tropical tree seedling dynamics: Recruitment patterns and their population consequences for three canopy species in Panama. *Journal of Tropical Ecology*, 10 (3): 369-383. <http://www.jstor.org/stable/2560320>
- DeCarlo A., Johnson S., Okeke-Agulu K. I., Dosoky N. S., Wax S. J., Owolabi M. S., et al., 2019. Compositional analysis of the essential oil of *Boswellia dalzielii* frankincense from West Africa reveals two major chemotypes. *Phytochemistry*, 164: 24-32. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2019.04.015>
- Djossa B. A., Fahr J., Wiegand T., Ayihouénou B. E., Kalko E. K., Sinsin B. A., 2008. Land use impact on *Vitellaria paradoxa* C.F. Gaerten. stand structure and distribution patterns: a comparison of Biosphere Reserve of Pendjari in Atacora district in Benin. *Agroforestry Systems*, 72 (3): 205-220. <https://doi.org/10.1007/s10457-007-9097-y>
- Emmanuel A. O., Adediji J. A., 2015. Morphometric study of testes of adult Wistar rats treated with aqueous extract of *Boswellia dalzielii* stem bark. *Journal of Dental and Medical Science*, 14 (10): 26-79.
- Eshete A., 2002. Regeneration status, soil seed bank and socio-economic importance of *Boswellia papyrifera* (Del.) Hochst. in two woredas of North Gonder zone, Northern Ethiopia. SIDS, Uppsala, Sweden, Agris, FAO. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=KE2005100716>
- Gijsbers H. J. M., Kessler J. J., Knevel M. K., 1994. Dynamics and natural regeneration of woody species in farmed parklands in the Sahel region (Province of Passore, Burkina Faso). *Forest Ecology and Management*, 64 (1): 1-12. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(94\)90122-8](https://doi.org/10.1016/0378-1127(94)90122-8)
- Glèlè Kakaï R., Bonou W., Lykke A. M., 2016. Approche méthodologique de construction et d'interprétation des structures en diamètre des arbres. *Annales des Sciences Agronomiques*, 20 : 99-112. <https://pdfcookie.com/download/approche-methodologique-de-construction-et-dinterpretation-des-structures-en-diametre-des-arbres-wrvrdnp5dz2o>
- Gouwakinnou G. N., Kindomihou V., Assogbadjo A. E., Sinsin B., 2009. Population structure and abundance of *Sclerocarya birrea* (A. Rich) Hochst subsp. *birrea* in two contrasting land-use systems in Benin. *International Journal of Biodiversity and Conservation*, 1 (6): 194-201. https://academicjournals.org/article/article1379947232_Gouwakinnou%20et%20al.pdf
- Gouwakinnou G. N., Lykke A. M., Assogbadjo A. E., Sinsin B., 2011. Local knowledge, pattern and diversity of use of *Sclerocarya birrea*. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 7 (1): 8. <https://doi.org/10.1186/1746-4269-7-8>
- Groom N., 1981. Frankincense and myrrh: a study of the Arabian incense trade. London, New York, Longman ELT, 285 p.
- Hänke H., Börjeson L., Hylander K., Enfors-Kautsky E., 2016. Drought tolerant species dominate as rainfall and tree cover returns in the West African Sahel. *Land Use Policy*, 59: 111-120. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.08.023>
- Idohou R., Assogbadjo A. E., Azihou F., Glèlè Kakaï R. G., Adomou A., 2016. Influence of the landscape context on stand structure and spatial patterns of the doum palm (*Hyphaene thebaica* Mart.) in the Republic of Benin (West Africa). *Agroforestry Systems*, 90 (4): 591-605. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-9920-4>
- Johnson N. L., Kotz S., 1970. Distributions in Statistics: Continuous Univariate Distributions. New York, USA, John Wiley & Sons, 756 p.
- Kelly B. A., Bouvet J.-M., Picard N., 2004. Size class distribution and spatial pattern of *Vitellaria paradoxa* in relation to farmers' practices in Mali. *Agroforestry Systems*, 60: 3-11. <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000009400.24606.e3>
- Kémeuzé V. A., Mapongmetsem P. M., Tientcheu M. A., Nkongmeneck B. A., Jiofack R. B., 2012. *Boswellia dalzielii* Hutch: état du peuplement et utilisation traditionnelle dans la région de Mbé (Adamaoua-Cameroun). *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 23 (4) : 278-283. <https://doi.org/10.1684/sec.2012.0365>
- Ky-Dembele C., Dayamba S. D., Savadogo P., Kalinganire A., Bayala J., Muchugi A., Ramni A., 2019. Land use dictates diversity, density and regeneration of woody species in southwestern Mali, West Africa. *Tropical Ecology*, 60 (1): 114-128. <https://doi.org/10.1007/s42965-019-00015-2>

Leminih M., Teketay D., 2003. Frankincense and myrrh resources of Ethiopia: I distribution, production, opportunities for dryland development and research needs. SINET, Ethiopian Journal of Science, 26 (1): 63-72. <https://www.ajol.info/index.php/sinet/article/view/1820>

Monzeglio U., Stoll P., 2008. Effects of spatial pattern and relatedness in an experimental plant community. Evolutionary Ecology, 22 (6): 723-741. <https://doi.org/10.1007/s10682-007-9197-1>

Nacoulma-Ouédraogo O. G., 1996. Plantes médicinales et pratiques médicales traditionnelles au Burkina Faso : cas du plateau central. Thèse de doctorat d'État, Faculté des sciences et techniques, Université de Ouagadougou, Burkina Faso.

Nussinovitch A., 2010. Plant Gum Exudates of the World: Sources, Distribution, Properties and Applications. Boca Raton, FL, USA, CRC Press, 101-102.

Ogbazghi W., 2001. The distribution and regeneration of *Boswellia papyrifera* (Del.) Hochst. In Eritrea. PhD thesis, Wageningen University, Netherlands, 144 p. <https://edepot.wur.nl/194745>

Ogbazghi W., Rijkers T., Wessel M., Bongers F., 2006. Distribution of the frankincense tree *Boswellia papyrifera* in Eritrea: the role of environment and land use. Journal of Biogeography, 33 (3): 524-535. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2005.01407.x>

Onana J. M., 1998. Les Buséracées du Cameroun : taxonomie, biométrie foliaire et biologie. Thèse de doctorat, Université de Yaoundé I, Cameroun, 267 p.

Ouédraogo A., Thiombiano A., 2012. Regeneration pattern of four threatened tree species in Sudanian savannas of Burkina Faso. Agroforestry Systems, 86 (1): 35-48. <https://doi.org/10.1007/s10457-012-9505-9>

Ouédraogo N., Lompo M., Sawadogo R. W., Tibiri A., Hay A. E., Koudou J., et al., 2012. Étude des activités anti-inflammatoire, analgésique et antipyrétique des décoctés aqueux des feuilles et des racines de *Pterocarpus erinaceus* Poir. (Fabaceae). Phytothérapie, 10 (5) : 286-292. <https://doi.org/10.1007/s10298-012-0732-z>

Ouédraogo A., Thiombiano A., Hahn-Hadjali K., Guinko S., 2006. Diagnostic de l'état de dégradation des peuplements de quatre espèces ligneuses en zone soudanienne du Burkina Faso. Science et changements planétaires/Sécheresse, 17 (4) : 485-491. <https://www.jle.com/fr/revues/sec/e-docs/diagnostic-de-letat-de-degradation-des-peuplements-de-quatre-especes-ligneuses-en-zone-soudanienne-du-burkina-faso-272388/article.phtml>

Philip S. M., 2002. Measuring Trees and Forests. 2nd ed. London, UK, CABI Publishing, 310 p.

Poupon H., 1970. Sur la croissance de quelques espèces de pin dans ses rapports avec le climat du Nord de la Tunisie. Thèse de doctorat, Université de Paris, Faculté des sciences d'Orsay, France, 131 p. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers20-09/07380.pdf

R Core Team, 2018. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria, R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>

RGPH, 2008. Recensement général de la population et de l'habitation de 2006. Burkina Faso, Institut national de la statistique et de la démographie, 52 p. http://www.cns.bf/IMG/pdf/RGPH_2006.pdf

Rijkers T., Ogbazghi W., Wessel M., Bongers F., 2006. The effect of tapping for frankincense on sexual reproduction in *Boswellia papyrifera*. Journal of Applied Ecology, 43: 1188-1195. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2006.01215.x>

SAS, 2006. SAS Online Doc 9.3. SAS Institute Inc., USA, 176 p.

Schumann K., Wittig R., Thiombiano A., Becker U., Hahn K., 2011. Impact of land-use type and harvesting on population structure of a non-timber forest product-providing tree in a semi-arid savanna, West Africa. Biological Conservation, 144: 2369-2376. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.06.018>

Setterfield S. A., 2002. Seedlings establishment in an Australian tropical savanna: effects of seed supply, soil disturbance and fire. Journal of Applied Ecology, 39: 949-956. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.2002.00772.x>

Thiombiano A., Wittig R., Guinko S., 2003. Conditions de multiplication sexuée chez les Combretaceae du Burkina Faso, Revue d'Écologie – La Terre et la Vie, 58 (4) : 361. <http://hdl.handle.net/2042/55562>

Thiombiano A., Schmidt M., Dressler S., Ouédraogo A., Hahn-Hadjali K., 2012. Catalogue des plantes vasculaires du Burkina Faso. Boissiera : mémoires des Conservatoire et Jardin botaniques de la Ville de Genève, 65 : 1-391. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4170248>

Vieira D. L. M., Scariot A., 2006. Principles of natural regeneration of tropical dry forests for restoration. Restoration Ecology, 14 (1): 11-20. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2006.00100.x>

Zar J. H., 1999. Biostatistical analysis. Noida, India, Pearson Education, 634 p.

Sabo et al. – Contribution des auteurs

Contributor's role	Names of authors
Conceptualisation	P. Sabo, A. Ouédraogo, K. V. Salako
Formal analysis	P. Sabo
Investigation and enquiry	P. Sabo
Methods	P. Sabo, A. Ouédraogo, C. D. S. J. Gbemavo, K. V. Salako, R. Glèlè Kakaï
Funding	A. Ouédraogo
Supervisors	A. Ouédraogo, R. Glèlè Kakaï
Validation	C. D. S. J. Gbemavo, A. Ouédraogo, K. V. Salako, R. Glèlè Kakaï
Writing - Preparation of the original draft	P. Sabo
Writing - Revision and editing	P. Sabo, A. Ouédraogo, C. D. S. J. Gbemavo, K. V. Salako, R. Glèlè Kakaï

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



THE WORLD BANK, 2020. **DESIGNING FISCAL INSTRUMENTS FOR SUSTAINABLE FORESTS**. USA, CLIMATE INVESTMENT FUNDS, 330 P.

This publication is an urgent call to action and provides policy makers with information to enable the design and implement fiscal policies that reduce incentives for deforestation, forest degradation, and land use change and instead encourage forest conservation, sustainable management, and green global value chains. Existing fiscal policies already provide incentives, oftentimes incentivizing short-lived economic growth through exhausting natural resources and merely turning natural capital into physical capital without creating net value. This book aims to empower decisionmakers to harness the power of fiscal policy for consciously creating incentives that direct development onto a more sustainable path. This book offers a vital reference for policy makers to do just that moving forward.

Summary adapted from the publisher's.

The World Bank, 1818 H Street,
NW Washington, DC 20433, USA.

https://www.climateinvestmentfunds.org/sites/cif_enc/files/knowledge-documents/designing_fiscal_instruments.pdf



DAÏNOU K., TOSSO D. F., BRACKE C., BOURLAND N., FORNI E., HUBERT D., KANKOLONGO M., LOUMETO J. J., LOUPPE D., NGOMANDA A., NGOMIN A., TCHUANTE TITE V., DOUCET J.-L., 2021. **GUIDE PRATIQUE DES PLANTATIONS D'ARBRES DES FORÊTS DENSES HUMIDES D'AFRIQUE**. BELGIQUE, PRESSES UNIVERSITAIRES DE LIÈGE, 322 P.

En Afrique, les plantations d'arbres sont amenées à se développer pour plusieurs raisons : restauration des capacités de production et des services rendus par les forêts naturelles, valorisation des terres agroforestières, récolte plus aisée du bois et des produits forestiers non ligneux, atténuation des effets des changements climatiques, etc. Les espèces exotiques n'offrant que des services spécifiques, il importe de redynamiser la plantation d'espèces locales. C'est l'objet de ce livre, qui s'est focalisé sur les essences des forêts denses humides, en capitalisant des résultats d'essais passés ou récents de six pays africains, et en mobilisant des compétences et connaissances de treize spécialistes. L'ouvrage aborde de façon pratique les différentes étapes d'un programme sylvicole : récolte et gestion des semences, construction et gestion des pépinières, modalités d'installation et de conduite des plantations. Une estimation des coûts et de la rentabilité de telles plantations est également fournie. Enfin, le livre décrit en détail l'itinéraire sylvicole de 50 espèces d'arbres des forêts denses humides africaines. Ce guide est destiné à un large public : aménagistes, techniciens et ingénieurs forestiers, étudiants et scientifiques intéressés par la sylviculture tropicale.

Résumé adapté de celui de l'éditeur.

Presses Universitaires de Liège,
place de la République Française,
4000 Liège, Belgique.

<http://hdl.handle.net/2268/259075>

Emmanuel KASONGO YAKUSU^{1,2,3}
Dominique LOUPPE^{4,5}
Franck K. MONTHE^{6,7}
Olivier J. HARDY⁸
Félicien BOLA MBELE LOKANDA⁸
Wannes HUBAU^{1,2}
Jan VAN den BULCKE¹
Joris VAN ACKER¹
Hans BEECKMAN²
Nils BOURLAND^{9,10}

Translation checked by Ilona BOSSANYI^{4,5,11}

Article previously published in French in the journal *Bois et Forêts des Tropiques*, No 339, January-March 2019: Kasongo Yakusu E., Louppe D., Monthe K. F., Hardy O. J., Bola Mbele Lokanda F., Hubau W., Van den Bulcke J., Van Acker J., Beeckman H., Bourland N., 2019. Enjeux et amélioration de la gestion des espèces du genre *Entandrophragma*, arbres africains devenus vulnérables. *Bois et Forêts des Tropiques*, 339 : 75-94. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2019.339.a31717>

¹ Ghent University
Department of Environment
Laboratory of Wood Technology
UGent-Woodlab
Coupure Links 653
9000 Gand
Belgium

² Royal Museum for Central Africa
Service of Wood Biology
Leuvensesteenweg, 13
3080 Tervuren
Belgium

³ Université de Kisangani
Faculty of Natural Renewable Resources Management
B.P. 2012, avenue Kitima, 3
Kisangani
Democratic Republic of the Congo

⁴ CIRAD
Forests & Societies
34398 Montpellier
France

⁵ Forests & Societies
Univ Montpellier, CIRAD
Montpellier
France

⁶ Université libre de Bruxelles
Faculty of Sciences
Biological Evolution and Ecology
CP 160/12, F. D. Roosevelt Avenue, 50
1050 Brussels
Belgium

⁷ Nature+ asbl / TERRA Forest Is Life,
Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège,
Passage des déportés 2,
5030 Gembloux,
Belgium

⁸ University of Kisangani
Faculty of Sciences
BP 2012, Avenue Kitima, 3
Kisangani
Democratic Republic of the Congo

⁹ Center for International Forestry Research
Situ Gede. Bogor Barat 16115
Indonesia

¹⁰ Resources and Synergies Development Pte Ltd.
Hong Leong Building
Singapore 04858
Singapore

¹¹ Cirad, Bois et Forêts des Tropiques
34000 Montpellier
France

Auteur correspondant /
Corresponding author:
Emmanuel Kasongo Yakusu
Emmanuel.KasongoYakusu@UGent.be
emmakasongo1@yahoo.fr

Improved management of species of the African *Entandrophragma* genus, now listed as vulnerable



Photo 1.
Entandrophragma cylindricum log in a processing plant (CFT) in Kisangani (DRC).
Photo N. Bourland.

Doi : 10.19182/bft2021.349.a36791 – Droit d'auteur © 2018, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 12 février 2018 ; date d'acceptation : 30 octobre 2018 ; date de publication version française : 15 janvier 2019 ; date de publication version anglaise : 1^{er} septembre 2021.



Licence Creative Commons :
Attribution - 4.0 International.
Attribution-4.0 International (CC BY 4.0)

Citer l'article / To cite the article

Kasongo Yakusu E., Louppe D., Monthe K. F., Hardy O. J., Bola Mbele Lokanda F., Hubau W., Van den Bulcke J., Van Acker J., Beeckman H., Bourland N., 2021. Improved management of species of the African *Entandrophragma* genus, now listed as vulnerable. *Bois et Forêts des Tropiques*, 349 : 65-84. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2021.349.a36791>

RÉSUMÉ

Enjeux et amélioration de la gestion des espèces du genre *Entandrophragma*, arbres africains devenus vulnérables

Par la qualité de leur bois et leurs nombreux usages traditionnels, les espèces du genre *Entandrophragma* font l'objet d'une intense exploitation, susceptible de compromettre leur pérennité en l'absence de gestion durable. La présente étude dresse un état de la situation de cinq espèces commerciales principales de ce genre : *Entandrophragma angolense*, *E. congoense* (souvent assimilée par erreur à *E. angolense*), *E. candollei*, *E. cylindricum* et *E. utile*. Elle propose des pistes de recherche pour améliorer les stratégies de gestion durable au sein de ce genre. L'étude est principalement basée sur les données scientifiques (publications), économiques (statistiques de production et d'exportation) et juridiques (lois et réglementations), mais aussi sur les plans d'aménagement et les rapports d'inventaire. Les connaissances sur leur gestion sont encore fragmentaires alors qu'elles sont considérées comme vulnérables dans la liste rouge de l'UICN. La forte exploitation industrielle et artisanale de ces espèces ne s'effectue pas toujours dans le respect d'un plan d'aménagement validé, ni de la durée minimum des rotations qui permettraient l'un et l'autre un taux de reconstitution pérennisant cette ressource. Leur gestion durable exige notamment le développement et le respect de mesures d'aménagement pour rendre leur exploitation renouvelable à long terme. Cette exploitation doit s'appuyer sur une gestion adéquate des peuplements naturels et sur le reboisement ainsi que sur des mesures de conservation. Les recherches à développer doivent intéresser leur vitesse de croissance face aux évolutions climatiques, l'évaluation de leurs stocks (production, biomasse, carbone), l'actualisation de leur distribution spatiale, l'amélioration de leur régénération naturelle, les processus de leur reproduction, leurs propriétés anatomiques et technologiques, autant de pistes pertinentes pour garantir la pérennité des espèces exploitables du genre *Entandrophragma*.

Mots-clés : *Entandrophragma*, aménagement forestier, exploitation forestière, bois, économie, forêt dense humide, gestion durable, reboisement, Afrique.

ABSTRACT

Improved management of species of the African *Entandrophragma* genus, now listed as vulnerable

Because of the quality of their wood and their many traditional uses, species of the *Entandrophragma* genus are being intensively logged, and this is likely to compromise their survival unless sustainable management is introduced. This study reviews the current status of the five main commercial *Entandrophragma* species: *Entandrophragma angolense*, *E. congoense* (often confused with *E. angolense*), *E. candollei*, *E. cylindricum* and *E. utile*. We suggest directions for research to improve sustainable management strategies for this genus. The study draws mainly on published scientific data, economic data (production and export statistics) and on relevant laws and regulations, but also on existing management plans and inventory reports. Although these species are reported as vulnerable on the IUCN Red List, knowledge on their management is still patchy. Industrial and artisanal logging is intensive and does not always follow a validated management plan or abide by the minimum rotation period, both of which would help to ensure the renewal of these resources. Managing them to ensure that logging is sustainable in the long term requires management measures to be developed and complied with. Sustainable use has to be based on appropriate management of natural stands and on reforestation and conservation measures. Research studies to be developed should encompass the growth rates of the species in the light of the changing climate, assessments of stocks (timber, biomass and carbon), updates of their spatial distribution, improvements to natural regeneration, reproduction processes and the anatomical and technical properties of each species. All these research topics are necessary to ensure the permanence of these *Entandrophragma* species.

Keywords: *Entandrophragma*, forestry, logging, wood, economy, dense humid forest, sustainable management, reforestation, Africa.

RESUMEN

Retos y mejoras para la gestión de las especies del género *Entandrophragma*, árboles africanos que han pasado a ser vulnerables

Por la calidad de su madera y sus numerosos usos tradicionales, las especies del género *Entandrophragma* son objeto de una intensa explotación, que puede comprometer su durabilidad sin una gestión sostenible. Este estudio describe la situación de las cinco especies comerciales principales de este género: *Entandrophragma angolense*, *E. congoense* (a menudo asimilada por error a *E. angolense*), *E. candollei*, *E. cylindricum* y *E. utile*. Y propone líneas de investigación para mejorar las estrategias de gestión sostenible aplicadas a este género. El estudio se basa principalmente en los datos científicos (publicaciones), económicos (estadísticas de producción y de exportación) y jurídicos (leyes y reglamentaciones), pero también en la ordenación forestal y los informes de los inventarios. Los conocimientos sobre la gestión de estas especies todavía son parciales, mientras que se consideran vulnerables en la lista roja de la UICN. La fuerte explotación industrial y artesanal de estas especies no se realiza siempre respetando un plan de ordenación validado, ni la duración mínima de las rotaciones que permitirían una tasa de repoblación que perpetuase este recurso. Su gestión sostenible exige principalmente el desarrollo y el respeto de medidas de ordenación para que la explotación sea renovable a largo plazo. Esta explotación debe basarse en una gestión adecuada de las poblaciones naturales y en la repoblación, así como en las medidas de conservación. Las investigaciones que se desarrollen deben tener en consideración la velocidad de crecimiento ante las evoluciones climáticas, la evaluación de los stocks (producción, biomasa, carbono), la actualización de la distribución espacial, la mejora de la regeneración natural, los procesos de reproducción, las propiedades anatómicas y tecnológicas, todas ellas pistas pertinentes para garantizar la perpetuidad de las especies explotables del género *Entandrophragma*.

Palabras clave: *Entandrophragma*, ordenación forestal, explotación forestal, leña, economía, bosque denso húmedo, gestión sostenible, repoblación, África.

Introduction

Timber extraction is one of the direct causes of tropical deforestation (Geist *et al.*, 2002; Gillet *et al.*, 2016). However, Karsenty and Ongolo (2012) note that, apart from cases of very intensive timber extraction in South-East Asia and Latin America, logging in the humid tropics is generally selective and rarely leads directly to sufficient felling and damage to be considered as deforestation. In the Congo Basin, Doucet and Kouadio (2007) point out that the timber market is also highly selective and that, as a result, extraction is limited to the largest and finest trees of a few species of high market value. In this context, the extraction of high-quality stems of a small number of species can actually result in genetic skimming of these species (Nanson, 2004). This high risk of genetic erosion concerns many African tree species of economic interest, including *Entandrophragma*.

The genus *Entandrophragma* C. DC. includes, depending on sources, 10 to 12 tree species distributed exclusively in tropical Africa (Kasongo Yakusu *et al.*, 2018). Within the Meliaceae family, this genus is the richest in precious species that have been logged for decades for industrial timber (Tailfer, 1989; Kasongo Yakusu *et al.*, 2018; Lebacqz *et al.*, 1950) because of the excellent quality of their wood, which is suited to a variety of uses including cabinet making. Lesucuyer *et al.* (2012) show that these species are also extracted by artisan loggers. The technological quality of the wood, and therefore its commercial value, varies from one species to another. Populations of *Entandrophragma* in dense humid forests include *E. angolense* (Welw.) C. DC. (trade name: white tiamia), *E. candollei* Harms (kosipo), *E. congolense* (Pierre ex De Wild.) A. Chev. (black tiamia), *E. cylindricum* (Dawe & Sprague) Sprague (sapelli), and *E. utile* (Dawe & Sprague) Sprague (sipo). They are distributed across a wide band north and south of the equator from the Atlantic coast through the Congo Basin to the western slope of the Kivu Ridge in the east (White, 1986; Kasongo Yakusu *et al.*, 2018). These species provide some of the most valuable timber (Hall, 2008; IITO, 2017). In the Central African Republic (CAR), they account for more than 70% of the total volume of timber exported (Hall, 2008). They have been heavily exploited in West Africa: Côte d'Ivoire, for example, exported more than 3.7 million m³ of *Entandrophragma* logs and more than 400,000 m³ of sawn timber between 1970 and 1974. As a result, logging of these species has dried up in West Africa while gradually shifting to Central Africa (Bayol *et al.*, 2012).

The five main *Entandrophragma* species extracted grow in evergreen and semi-deciduous dense humid forests (Meunier *et al.*, 2015; Kasongo Yakusu *et al.*, 2018) where they have been logged to such an extent that natural regeneration has not been able to restore populations to their initial states, all the more so as natural regeneration is sometimes defective in these species (Lemmens, 2008). This state of affairs is raising serious concerns about the conservation risks weighing on these species, which are now listed as “vulnerable” on the IUCN Red List (IUCN, 2012). Listing in this category is not intended to prohibit their extraction, but

rather to draw the attention of forest managers (e.g. States and logging companies) to the need to create the necessary conditions to manage forest resources, and these species more specifically, for sustainability. The conservation status of *Entandrophragma* species will certainly evolve according to the conditions of their extraction and regeneration and their population dynamics. It is therefore advisable to draw up a status report on these species, taking into account not only their economic importance but also the legislation and regulations in force concerning resource management. Relevant information should therefore be collected on their growth dynamics, their environmental requirements and their economic value based on the anatomical and technological properties of their wood and on their social importance.

The aim of this review is to gather and analyze published knowledge on the most heavily exploited *Entandrophragma* species in Africa (sapelli, sipo, kosipo, black and white tiamas) in order to:

- characterize their growth and the quality of their wood;
- evaluate the scale of their extraction;
- describe their economic, industrial and commercial status;
- analyze the impact of legal and regulatory measures concerning forest development and management;
- discuss the relevance of their conservation status in the light of anthropogenic pressures on their populations; and
- identify research themes aimed at good management of their populations in order to ensure that their extraction is sustainable.



Photo 2.
Sawn timber of *Entandrophragma cylindricum* ready for export.
Photo N. Bourland.

Growth dynamics

Tree-ring analysis and growth rates

Tree-ring analysis

Distinct growth rings are marked by a sudden structural change at the boundaries between them, usually involving a change in fibre wall thickness and/or radial fibre diameter, whereas indistinct or absent growth rings are unclear and marked by more or less progressive structural changes at their ill-defined or non-visible boundaries (IAWA, 1989). Tree ring analysis makes it possible to measure a tree's past growth rate and its variations (e.g. due to climatic changes through analysis of the ring width/rainfall relationship) and



Photo 3.
Sampling straw used to record data from a core extracted from a stem of *Entandrophragma* sp. in the buffer zone of the Yangambi Biosphere Reserve.
Photo M. Devriendt.

to estimate its age. The presence and legibility of rings thus allow dendrochronological analysis, provided that each ring can be associated with a given year and measured accurately (Fétéké *et al.*, 2016). The first observations made on *Entandrophragma*, notably *E. cylindricum* and *E. utile*, show rings bordered by a thin continuous line and likely to be annual (Détienne and Mariaux, 1977; Porter *et al.*, 2004). However, Banak *et al.* (2008) note that the ring boundaries of *E. angolense*, *E. cylindricum* and *E. utile* are sometimes indistinct or absent and those of *E. candollei* are generally indistinct or absent. Although reading the rings in species of the genus *Entandrophragma* can be difficult, doing so would bring a better understanding of their diametric growth rate, at least for some of the species.

The study of stable oxygen isotopes ($\delta^{18}O$) in the growth rings of tropical trees is another promising tool for high-resolution (annual) climate reconstructions. Because of the easily measurable and datable growth rings in *E. utile*, the presence of a strong common $\delta^{18}O$ signal and its relationship with regional rainfall, Van der Sleen *et al.* (2015) argue that $\delta^{18}O$ analysis of these rings is a promising tool for reconstructing climate variability over the past few centuries in Africa. This new research applied to other commercial *Entandrophragma* species would allow climate reconstructions from distinct growth rings.

Growth rate

According to Couralet *et al.* (2010), the growth rate of trees, and thus the formation of growth rings, depends mainly on climatic variations. The optimal seasons for diametric growth and ring formation in *Entandrophragma* in Côte d'Ivoire, Cameroon and CAR are the two rainy seasons. A brief cessation of diametric growth in some stems is observed during the short dry season in July-August, while the long dry season corresponds to a period of slow or no growth (Détienne *et al.*, 1977; Fétéké *et al.*, 2016). In general, the resumption of growth activity in *Entandrophragma* occurs during the first rainy month and is not modified by variations in the rainfall regime during the growing season from April to November (Détienne *et al.*, 1977).

Measuring increase in diameter

In Central and West Africa, management rules for commercial species are based on the recovery rate of the number and standing volume of target species (Durrieu de Madron and Fomi, 1997). The calculation of the recovery rate is based in particular on the rate of diametric growth (Fétéké *et al.*, 2016). Tree-ring analysis and diameter measurements repeated over time (table I) have been carried out in Cameroon, Côte d'Ivoire, Ghana, CAR and the Republic of

Table I.

Average annual diametric increase of *Entandrophragma* species.

Cam: Cameroun; CAR: Central African Republic; CI: Côte d'Ivoire; RC: Republic of the Congo.

Species	Methods used					
	Tree-ring analysis (mm/year)			Owona Ndongo <i>et al.</i> , 2009 Cam	Measurement of circumference (mm/year)	
	Détienne <i>et al.</i> , 1998				Détienne <i>et al.</i> , 1998 Ghana	Gillet <i>et al.</i> , 2008 RC
	Cam and CI	RCA (FAC 192)	RCA (Sangha M'Baéré)			
<i>Entandrophragma angolense</i>	5.8	4.6	4.9	–	4-5	4
<i>Entandrophragma candollei</i>	5.8	5.1	4.6	4.4	4-5	6
<i>Entandrophragma cylindricum</i>	3.4	4.8	3.9-4.7	3	4-5	8
<i>Entandrophragma utile</i>	3.7	5.8	6.5	–	4-5	8.5

–: no information.

the Congo (Congo) to study the growth of certain commercial *Entandrophragma* species (Détienne and Mariaux, 1977; Adler, 1989; Détienne *et al.*, 1998; Durrieu de Madron *et al.*, 2000; Gillet *et al.*, 2008; Owona Ndongo *et al.*, 2009; Fétéké *et al.*, 2015, 2016).

The increases observed with these two methods are comparable. For a given species, they give fairly precise ranges of diametric growth rates and make it possible to calculate the recovery rate between two rotations. In order to refine the knowledge of their growth in diameter, further research would be needed on the basis of larger numbers distributed over the entire range of *Entandrophragma* (Durrieu de Madron *et al.*, 2000). As growth rates also strongly depend on the social hierarchy of a tree in relation to neighbouring stems (Gillet *et al.*, 2008), the diametric growth of the tree should be measured in relation to its social status (dominated, co-dominant and dominant). According to Durrieu de Madron *et al.* (2000), the average annual diametric growth of *E. cylindricum* varies from 2.8 to 7.7 mm/year, but Gillet *et al.* (2008) showed that part of this variability can be explained by the social status of the tree. These authors thus determined that the average growth in diameter of a dominated tree was 5 mm/year, 8 mm/year for a co-dominant and 11 mm/year for a dominant tree. However, the growth rate also depends on other factors such as soil quality, inter-annual climate variability, especially rainfall, and the intensity and history of logging operations, which in particular modify competition between trees. As a result of all these factors, the growth of a sapelli (as well as other *Entandrophragma* species) can vary by as much as a factor of two depending on the year (Fétéké *et al.*, 2016).

Anatomical and technological properties

The origin and growing conditions of a tree influence the physical and mechanical properties of its wood (Gubal *et al.*, 2016). Applied anatomy helps to understand the properties of wood materials and to explain variations in the quality of wood and processed products (Louppe, 2015). Gérard (1999) therefore recommends that these properties, which make it possible to qualify wood according to its intended use, should be systematically studied and analyzed in order to optimize the use of African species and respond in a relevant way to the demands of industrialists and end users. Anatomy, through the identification of logs and processed wood, makes it possible to control the timber trade, and particularly illegal trade. It can therefore contribute to the sustainable management of certain tree species whose excessive extraction and trade can result in the disappearance of their habitat, or even their extinction (Louppe, 2015). This knowledge is necessary to justify priority measures to ensure that species threatened by intensive extraction, in this case *Entandrophragma*, are managed sustainably (e.g. orientation towards forestry and integration into a reforestation programme).

Anatomical properties

Anatomical descriptions of *Entandrophragma* wood according to IAWA standards have been made by several authors under PROTA (Louppe *et al.*, 2008). These descriptions have been integrated into the *InsideWood* website (<http://insidewood.lib.ncsu.edu>). Anatomically, the wood of these species differs little except for a few distinctive features (Brazier and Franklin, 1961; Banak *et al.*, 2008;

Table II.

Distinctive anatomical features of the wood of *Entandrophragma* species (adapted from Banak *et al.*, 2008).
Anatomical feature: totally distinctive (unique to the species concerned); moderately distinctive (also observed in a species other than the species concerned) and marginally distinctive (also observed in two species other than the species concerned).

Species	Anatomical characteristics		
	Totally distinctive	Moderately distinctive	Marginally distinctive
<i>Entandrophragma angolense</i>	12: solitary vessel outline angular; 107: Body ray cells procumbent with mostly 2 to 4 rows of upright and/or square marginal cells.	94: over eight cells per parenchyma strand.	1: Growth ring boundaries distinct; 98: Larger rays commonly 4- to 10- seriate; 115: Rays per millimetre (4-12/mm); 136: Prismatic crystals present; 141: Prismatic crystals in non-chambered axial parenchyma cells; 142: Prismatic crystals in chambered axial parenchyma cells.
<i>Entandrophragma candollei</i>	43: Mean tangential diameter of vessel lumina \geq 200 μ m; 84: Axial parenchyma unilateral paratracheal; 159: Silica bodies present in axial rays; 161: Silica bodies in axial parenchyma cells.	46: Vessels per square millimetre (\leq 5 vessels per square millimetre); 94: Over eight cells per parenchyma strand.	82: Axial parenchyma winged-aliform; 85: Axial parenchyma bands more than three cells wide; 86: Axial parenchyma in narrow bands or lines up to three cells wide; 98: Larger rays commonly 4- to 10-seriate; 115: Rays per millimetre (4-12/ mm).
<i>Entandrophragma cylindricum</i>	25: Intervessel pits small (4-7 μ m); 81: Axial parenchyma lozenge-aliform.	97: Ray width 1 to 3 cells; 104: All ray cells procumbent; 118: All rays storied; 131: Intercellular canals of traumatic origin; 137: Prismatic crystals in upright and/or square ray cells.	1: Growth ring boundaries distinct; 82: Axial parenchyma winged-aliform; 85: Axial parenchyma bands more than three cells wide; 86: Axial parenchyma in narrow bands or lines up to three cells wide; 98: Larger rays commonly 4- to 10-seriate; 115: Rays per millimetre (4-12/mm); 141: Prismatic crystals in non-chambered axial parenchyma cells; 142: Prismatic crystals in chambered axial parenchyma cells.
<i>Entandrophragma utile</i>		46: Vessels per square millimetre (\leq 5 vessels per square millimetre); 97: Ray width 1 to 3 cells; 104: All ray cells procumbent; 118: All rays storied; 131: Intercellular canals of traumatic origin; 137: Prismatic crystals in upright and /or square ray cells.	1: Growth ring boundaries distinct; 82: Axial parenchyma winged-aliform; 85: Axial parenchyma bands more than three cells wide; 86: Axial parenchyma in narrow bands or lines up to three cells wide; 136: Prismatic crystals present; 141: Prismatic crystals in non-chambered axial parenchyma cells; 142: Prismatic crystals in chambered axial parenchyma cells.

table II). The anatomical identification key for the four main *Entandrophragma* species proposed by Brazier and Franklin (1961) was established from a small number of specimens (4-7 per species). It has therefore been completed (table II) thanks to the anatomical descriptions made by Banak *et al.* (2008).

Five features fully characterize *E. candollei* (43, 84, 159, 160 and 161); two distinguish *E. angolense* (12 and 107) and *E. cylindricum* (25 and 81). Five moderately distinctive anatomical features (97, 104, 118, 131 and 137) bring *E. cylindricum* and *E. utile* closer together, which are otherwise separated by two anatomical features (25 and 81); the marginally distinctive feature (98) is observed in *E. cylindricum*, and the (46) in *E. utile*. In addition, the wood of *E. cylindricum* often has a more pleasing colour and is more

attractively patterned (Lemmens *et al.*, 2008). The same moderately distinctive anatomical feature (94) is common to the wood of *E. candollei* and *E. angolense*. *E. candollei* differs from the other three species by the presence of silica in the rays, the axial parenchyma and in the fibres (159, 160 and 161).

The wood anatomy of these species should be studied in greater depth to better distinguish the growth ring boundaries by analyzing the diameter of the vessels. Measuring the width of growth rings from the pith to the bark at different heights of the trunk would thus improve knowledge of the growth in diameter and height of *Entandrophragma* (Beckman, 2016).

Table III.
 The main physical and mechanical features of commercial *Entandrophragma* species.

Feature	<i>Entandrophragma angolense</i>	<i>Entandrophragma candollei</i>	<i>Entandrophragma cylindricum</i>	<i>Entandrophragma utile</i>
1. Physical				
Density when green (kg/m ³)	850-950	850-950	850-950	800-900
Density when dry* (kg/m ³)	500-735	570-810	560-780	550-680
Monnin hardness*	2.4	3.2	4.2	3
Fibre saturation point (%)	33	32	29	30
Total volumetric shrinkage (%)	12	13.1	13.1	12.4
Total tangential retraction (%)	5.8 - 9.6	5.7-7.6	4.3-9.8	6.4
Total radial / axial shrinkage (%)	3.8-6.6	4.4-5.1	3.5-7.6	4.6
Stability to air humidity variations	Medium	Low	Low to medium	Low to medium
Stable on average	Moderately stable to stable	Stable	Moderately stable	Moderately stable to stable
2. Mechanical				
Stress rupture in parallel compression* (N/mm ²)	37-67	47-53	40-75	45-72
Static bending breaking stress* (N/mm ²)	92-127	97-122	114-142	101-114
Longitudinal and flexural modulus of elasticity* (N/mm ²)	7,900-14,700	7,940-11,800	11,200-11,300	8,830-13,830
References	Cirad, 2015; Dahms, 1999; Tchinda, 2008; Gérard <i>et al.</i> , 1998; ATIBT, 1986	Cirad, 2015; Nyunai, 2008; Dahms, 1999; Gérard <i>et al.</i> , 1998; ATIBT, 1986	Cirad, 2015; Kémeuzé, 2008; Dahms, 1999; Gérard <i>et al.</i> , 1998; ATIBT, 1986	Cirad, 2015; Dahms, 1999; Kémeuzé, 2008; Gérard <i>et al.</i> , 1998; ATIBT, 1986

* at 12% humidity.

Socio-economic value

Technological properties

The timber properties of the main commercially extracted *Entandrophragma* species are well documented (ATIBT, 1986; Gérard *et al.*, 1998; Dahms, 1999; Kémeuzé, 2008; Nyunai, 2008; Tchinda, 2008; CIRAD, 2015; Gérard *et al.*, 2016). They seem to vary greatly from one species to another as well as within the same species. The main physical and mechanical characteristics (e.g. dry density, hardness and stability) of the four commercial *Entandrophragma* species are summarized in table III. They predispose these species to the timber industry, especially as their heartwood used outside wetlands is also known to resist attack by fungi, dry wood insects and termites (Staner *et al.*, 1958; Gérard *et al.*, 2016).

Economic value

Entandrophragma species as well as those of *Swietenia* Jacq. and *Khaya* A. Juss. are listed under the Anglo-Saxon name of Mahogany, which includes the best woods for cabinet-making worldwide (White and Gasson, 2008). African mahogany includes the genera *Khaya* and *Entandrophragma*, which are among the most valuable forest species and are traded in significant volumes, accounting for more than 70% of the total volume exported from CAR (Hall, 2008) for example. *Entandrophragma* is the only genus of which five species are extracted from Africa's dense tropical forests (Staner *et al.*, 1958; Bayol *et al.*, 2012). To understand the economic importance of these species and the threats to their future, it would be important to know how harvests in their range have evolved since the 1960s on a country-by-country basis, in order to follow the migration of logging areas over time.

Distribution area

Six species of *Entandrophragma* are very widely distributed across the Guinean-Congolese zone: *E. angolense*, *E. candollei*, *E. congoense*, *E. cylindricum*, *E. palustre* and *E. utile* (Kasongo Yakusu *et al.*, 2018). With the exception of *E. palustre*, which is restricted to swamp forests, mainly in DRC and the Republic of the Congo (Lemmens, 2008), the other five species grow in dense evergreen and semi-deciduous tropical forests (Meunier *et al.*, 2015; Kasongo Yakusu *et al.*, 2018). Figure 1 shows the geographical distribution of these species, adapted from the “Rainbio” database (Dauby *et al.*, 2016). *E. cylindricum* and *E. angolense* have the widest distribution and are locally more abundant than *E. candolei* and *E. utile* (Doumenge *et al.*, 2010; Kasongo Yakusu *et al.*, 2018).

Concentration of production in West Africa

Statistics (from the 1960s onwards) on timber production in logs or exports by type of product (e.g. logs, sawn wood, peeled veneer and plywood) and by *Entandrophragma* species are rarely available and accessible. Moreover, they are not regular and not chronologically continuous. From data published in the *Bois et Forêts des Tropiques* journal between 1963 and 1974 under the heading “*Commerce des bois tropicaux*”, it is possible to track *Entandrophragma* log exports from 1963 to 1973 from Côte d’Ivoire, Cameroon and Gabon. Although they are patchy, ATIBT statistics can be used to draw out figures for Gabon for the 1998-2003 period. Large quantities of *Entandrophragma* logs were exported during 1963-1973: ± 6 million m³ of sipo, ± 1.5 million m³ of sapelli and ± 5 million m³ of white tiamia from Côte d’Ivoire; $\pm 350,000$ m³ of sapelli, $\pm 150,000$ m³ of sipo and $\pm 40,000$ m³ of kosipo from Cameroon; $\pm 200,000$ m³ of sipo, $\pm 150,000$ m³ of sapelli and $\pm 75,000$ m³ of tiamia from Congo and $\pm 25,000$ m³ of sipo, $\pm 15,000$ m³ of white tiamia

and $\pm 7,000$ m³ of sapelli from Gabon. Figure 2 shows these exports by year. For the 1996-2013 period, only the statistics for Gabon are available: this country exported $\pm 200,000$ m³ of *Entandrophragma*.

Côte d’Ivoire is the country where commercial *Entandrophragma* species have been most heavily logged (around 10 million m³ of logs extracted between 1963 and 1973). Together with the encroachment of agricultural land into forest areas, this has greatly reduced the resource. From the mid-1970s onwards, exports began to decline (figure 2) and by the 2000s, the resource had been exhausted. Statistics on the number of logs entering sawmills then only concern *E. angolense*, with 41,700 m³ of logs in 2004 and 10,400 m³ in 2012 (Louppe and Ouattara, 2013), the other species of the genus being extracted only in small quantities.

Central Africa, a new reservoir for production

Currently, logging of these species has shifted to other regions. Table IV shows this shift between 2005 and 2012, during which time controlled production, production of *Entandrophragma* logs in Central Africa was as follows:

- sapelli: Congo ± 3.5 million m³, Cameroon ± 3 million m³, CAR ± 2 million m³ and DRC $\pm 500,000$ m³;
- sipo: Congo $\pm 550,000$ m³, DRC $\pm 200,000$ m³ and CAR $\pm 150,000$ m³;
- kosipo: Cameroon $\pm 300,000$ m³, CAR $\pm 150,000$ m³, Congo $\pm 75,000$ m³ and DRC $\pm 50,000$ m³; and
- white tiamia: CAR $\pm 100,000$ m³; DRC $\pm 100,000$ m³.

In the early 2010s, Congo and Cameroon were the main producers of *Entandrophragma* timber (Bayol *et al.*, 2012). The history of trade in sapelli clearly illustrates the scale of extraction of species of the genus. In West Africa, logging has greatly reduced populations of sapele, so that

it has shifted to Central Africa, currently the main production centre (Eckebil *et al.*, 2017) where it is by far the most heavily logged mahogany species with ± 1.3 million m³ in 2008 (Bayol *et al.*, 2012). Extraction of sipo and kosipo is low in comparison with $\pm 130,000$ and $\pm 100,000$ m³, respectively, in 2008 (figure 3). In Central Africa, in 2008, only okoume (*Aucoumea klaineana*) was extracted in greater quantities than sapelli. The low volumes of sipo can be explained by its widely scattered distribution in the forest massif, which has led some forest managers to exclude it from the main target species (Bayol *et al.*, 2012).

Social value

Multiplicity of social uses

Entandrophragma has multiple uses that are well known to local people (table V). They use the different parts of the tree to satisfy needs for food (e.g. collecting caterpillars), construction, handicrafts, medicines, livelihoods, economy

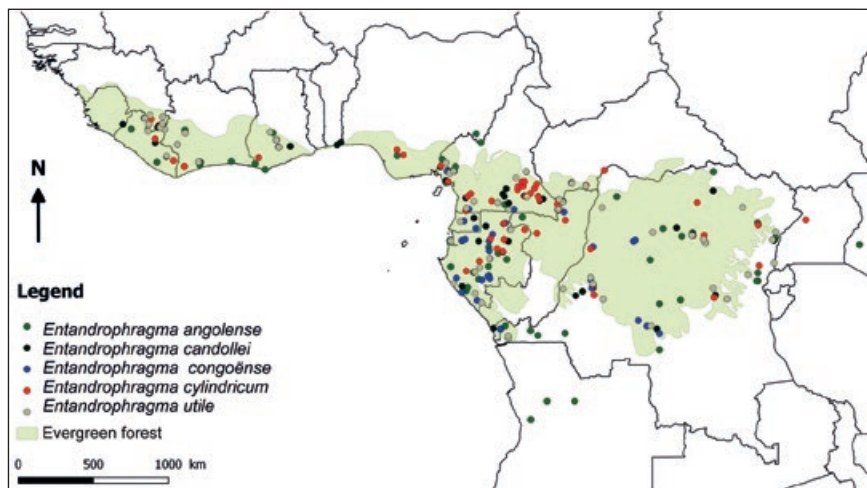


Figure 1. Geographical distribution of the main commercial species of the genus *Entandrophragma* (map adapted from the “Rainbio” database; Dauby *et al.*, 2016).

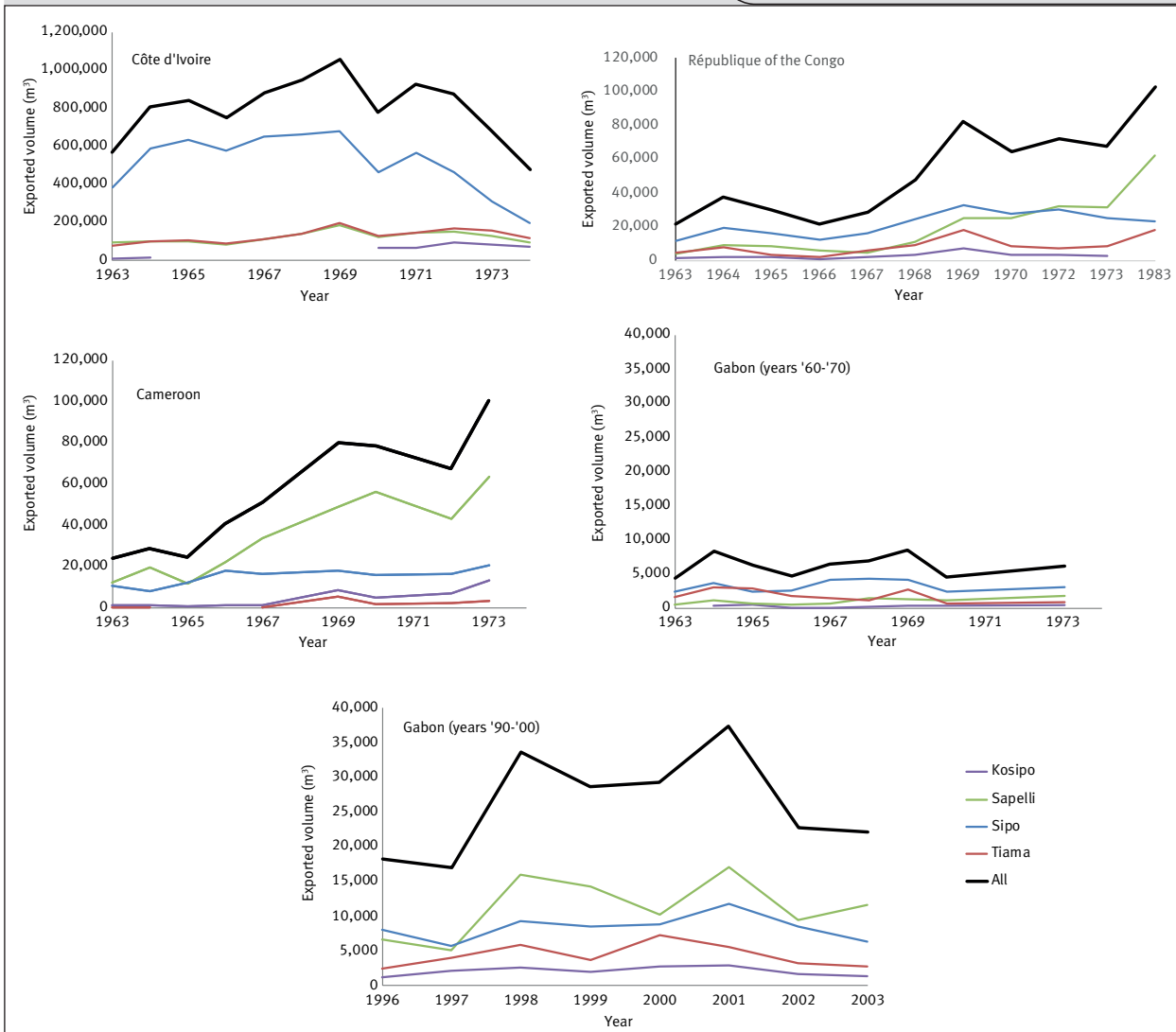


Figure 2. *Entandrophragma* timber exports from Côte d'Ivoire (1963 to 1973), Cameroon (1963 to 1973), Congo (1963 to 1973) and Gabon (1963 to 1973 and 1998 to 2003). Sources: before 1973, Bois et Forêts des Tropiques; after 1998, ATIBT newsletter.

and transport (dugout canoes), and others. (table V). The bark of all these species is used as medicine against various diseases. The roots of *E. candollei* are used as an anti-venom against snake bites. The seeds of *Entandrophragma* (e.g. *E. angolense*) are rich in oils that deserve detailed studies on their properties, including toxicity (Lemmens *et al.*, 2010). In view of their multiple medicinal uses, it would be advisable to conduct additional pharmacological studies on the bark and roots and chemical analyses to identify the active molecules.

Analysis and management of potential social conflicts

Some uses can have both positive and negative impacts on *Entandrophragma* stands and are therefore a source of conflict between local communities and logging concession managers (e.g. tree felling limits possibilities for collecting caterpillars). Edible caterpillars of the species *Imbrasia oye-mensis*, which infest large sapelli, are harvested between July and August (Palla *et al.*, 2002; Ekebil *et al.*, 2017). It

has sometimes been observed that collecting for food or medicinal purposes has led to trees being felled instead of conserved by users. This use of non-timber forest products by forest populations is in opposition to industrial logging (Vermeulen *et al.*, 2009) and can generate conflicts between logging operators and surrounding populations. Inclusive management of production forests in Central Africa should therefore be considered to avoid or reduce these conflicts (Karsenty and Vermeulen, 2016). This management model is observed, for example, in northern Congo, where FSC (Forest Stewardship Council) certified logging companies mark the caterpillar-infested sapelli trees with the local population to prevent them from being felled. In addition to this effective participatory approach, the CFT (*Compagnie Forestière et de Transformation*) (2015) recommends conducting an analysis of potential use conflicts village by village during the preparation of annual logging plans, so that measures can be taken to reduce the social impact, in particular by protecting trees that are important to local populations. Tieguong *et*

Table IV.

Entandrophragma timber production (volumes felled in m³) from 2005 to 2012 in Cameroon, Republic of the Congo, Central African Republic and Democratic Republic of the Congo (adapted from de Wasseige *et al.*, 2014).

Date	Cameroon				Republic of the Congo				Central African Republic				Democratic Republic of the Congo			
	Kosipo	Sapelli	Sipo	Tiama	Kosipo	Sapelli	Sipo	Tiama	Kosipo	Sapelli	Sipo	Tiama	Kosipo	Sapelli	Sipo	Tiama
2005	41,315	378,756	-	-	4,320	496,547	72,906	-	6,786	215,220	21,896	3,095	4,189	34,792	20,565	9,669
2006	45,367	377,142	-	-	12,177	316,098	75,971	-	17,174	335,604	28,909	14,399	-	65,465	31,773	11,992
2007	43,751	395,469	-	-	29,641	295,221	80,076	-	24,033	295,954	21,098	14,561	-	60,914	26,952	10,986
2008	46,151	408,068	30,901	-	13,269	343,652	35,749	-	3,0921	271,283	28,329	16,493	8,303	56,542	30,537	15,716
2009	35,267	264,771	-	-	-	412,406	128,530	-	12,548	188,206	17,359	5,176	12,768	62,079	39,356	17,312
2010	-	343,797	-	-	-	540,563	53,641	-	16,798	185,619	-	5,931	-	68,561	15,964	10,416
2011	-	365,446	-	-	-	546,440	49,035	-	22,050	215,616	13,937	17,623	-	79,811	15,902	5,714
2012	43,717	375,729	-	-	-	449,456	52,379	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	255,568	2,099,178	30,901	-	59,407	3,400,383	548,287	-	130,310	1,707,502	131,528	77,278	2,726	428,164	181,049	81,805

--: no information.

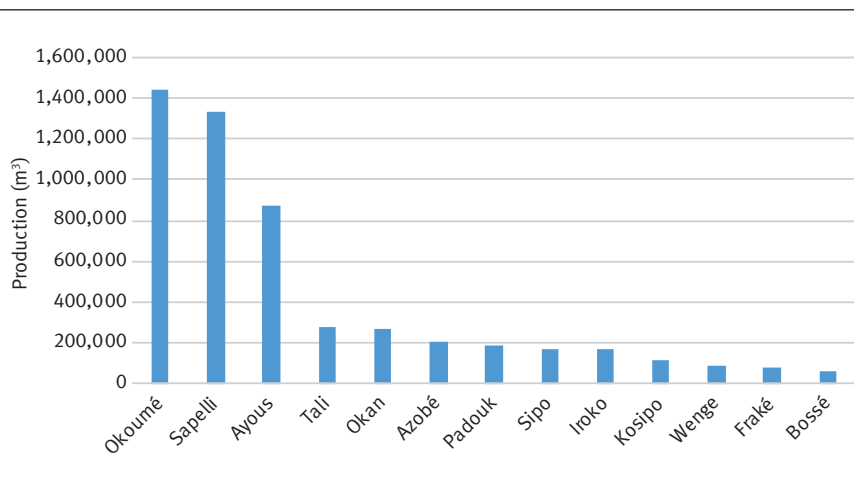
al. (2017) emphasize the need for information on the availability and accessibility of multiple-use tree species in order to negotiate management agreements that satisfy both concession holders and local communities. Thus, certain populations of sapelli or other *Entandrophragma* species of high commercial value present in village lands should be classified as Type 5 High Conservation Value Zones (“forest areas providing local communities with the resources necessary to meet their basic needs [...]”) (Daïnou *et al.*, 2016).

Management of *Entandrophragma* populations

Conservation status

Brief overview of the classification method

The four main *Entandrophragma* species (for a long time considered similar to white tiama, very few data exist on the ecology of black tiama. Despite this, black tiama is different to white tiama morphologically and genetically; Monthe *et al.*, 2018) are classified as “Vulnerable” on the IUCN Red List (IUCN, 2012). However, none of them are listed in CITES Appendix I (“includes all species threatened with extinction [...]”; CITES, 1983) or Appendix II (“includes all species that might be threatened with extinction if trade in specimens of such species were not subject to strict regulation [...]”; CITES, 1983). A taxon is said to be “vulnerable” when the best available data (Sépulchre *et al.*, 2008) indicate that it meets, to a very precise degree, one of the following 5 criteria: reduction of the population, fragmented or declining geographical distribution (area of occurrence and area of occupancy), small and declining population (number of mature individuals), very small or restricted population, more than 50% probability of extinction within 10 years of three generations. Parts of this methodology proposed by the IUCN have been questioned by Sépulchre *et al.* (2008) because some criteria, which are difficult to quantify, are derived from estimates (of adult individuals) at the worldwide level. The IUCN has considered developing “regional” and/or “sub-regional” red lists (Sépulchre *et al.*,

**Figure 3.**

Estimated 2008 production by species in the Congo Basin (m³) (Bayol *et al.*, 2012). Okoumé: *Aucoumea klaineana*; Sapelli: *Entandrophragma cylindricum*; Ayous: *Triplochiton scleroxylon*; Tali: *Erythrophleum* spp.; Okani: *Cylicodiscus gabonensis*; Azobé: *Lophira alata*; Padouk: *Pterocarpus soyauxii*; Sipo: *Entandrophragma utile*; Iroko: *Milicia excelsa*; Kosipo: *Entandrophragma candollei*; Wenge: *Millettia laurentii*; Fraké: *Terminalia superba*; Bossé: *Leplaea* spp.

Tableau V.
 Social uses of the four main commercial *Entandrophragma* species.

Used parts	Uses			
	<i>Entandrophragma angolense</i> (white tiama)	<i>Entandrophragma candollei</i> (kosipo)	<i>Entandrophragma cylindricum</i> (sapelli)	<i>Entandrophragma utile</i> (sipo)
Trees	Used in agroforestry as an alignment and shade tree.		Used in agroforestry as an alignment, ornamental and shade tree. Hosts edible caterpillars.	
Wood	Coffins, musical instruments, toys, sculptures, timbering, firewood and charcoal.	Timber, toys and novelty items.	Musical instruments, sculpture, toys, novelty items, manufacture of monocoque dugout canoes, timbering, firewood and charcoal.	Sculpture, dugout canoes, timbering, firewood and charcoal.
Bark	Its decoction is drunk to treat fever and the bark is used as an analgesic for stomach aches, peptic ulcers, earache, kidney, rheumatic or arthritic pain, eye infections, oedema and ulcers.	Yellow fever, malaria, typhoid. Used as an analgesic.	Its decoctions or macerations are used against malaria, bronchitis, lung ailments, colds, oedemas and as an analgesic; the pulp against boils and wounds. Its extracts were once used as a protective agent for stored maize.	Juice used for stomach and kidney pains, rheumatism, eye baths, inflammations, ear infections, headaches, malaria and peptic ulcers.
Leaves	–	–	Hosts the edible caterpillars of the <i>Imbrasia oyemensis</i> butterfly.	Hosts edible caterpillars.
Seeds	Rich source of oil (about 60% fat content).	–	Source of oil (approx. 45% fat content).	Source of oil (approx. 30-54% fat content) and essential oil.
Root	–	The root bark is applied to snake bites.	–	–
References	Tchinda, 2008.	Dibong <i>et al.</i> , 2011; Nyunaï, 2008	Jagoret <i>et al.</i> , 2014; Mate <i>et al.</i> , 2013; Lisingo <i>et al.</i> , 2012; Dibong <i>et al.</i> , 2011; Kémeuzé, 2008	Mate <i>et al.</i> , 2013; Lisingo <i>et al.</i> , 2012; Mujuni, 2008; Onifade, 2006

–: no information.

2008), which would allow a better assessment of the risk to species at the local level. It can thus be assumed that *Entandrophragma* from Côte d'Ivoire could be classified as “endangered” due to over-logging and drastic reduction of its habitat following land use changes.

Intensification of logging

Intensive logging of *Entandrophragma* in Central Africa could, as in West Africa, compromise the sustainability of these species. This situation varies from one species to another and from one region to another. In Central Africa, sapelli was still abundant in 2008 despite intensive logging in northern Congo, south-western CAR and DRC. At the time, this species did not show any obvious signs of vulnerabi-

lity (Sépulchre, 2008), but as it provides one of the most commercially important timbers in Africa, it is still being exploited without sufficient efforts to ensure that logging is sustainable (Kémeuzé, 2008). There is therefore a risk that the scenario observed in West Africa, where exploitable trees have practically disappeared to the extent that some industrialists in Côte d'Ivoire now import sapelli from Congo (Louppe and Ouattara, 2013), will be repeated. Moreover, some industrial groups prefer to transport raw or only partially processed products from Central Africa to West Africa, where processing units with trained personnel have been established. In the absence of specific management measures for *E. utile*, Sépulchre *et al.* (2008) consider the species to be threatened despite a fairly good population

structure showing the existence of satisfactory natural regeneration. Commercial interest in its timber has led to the extraction of the largest and most standards-compliant individual trees from the forests of Côte d'Ivoire, Ghana, Nigeria, Cameroon, CAR and Uganda. As a result, in Uganda for example, the species is on the brink of extinction (Mujuni, 2008). *E. angolense* is also threatened with genetic erosion in the near future and is considered to be under threat in Ghana and Uganda (Tchinda, 2008) and close to extinction in Kenya (Fischer *et al.*, 2010). *E. candollei*, whose timber is somewhat less valued, is nevertheless being logged in many areas on a probably unsustainable basis (Nyunaï, 2008). The data presented above are almost a decade old. Since then, due to numerous habitat modifications, increasing pressure on these species, the scale of poorly controlled

artisanal logging and inadequate enforcement of regulations and sustainable management measures, the situation has probably worsened. There is therefore an urgent need to reassess the vulnerability of each *Entandrophragma* species in each country so that appropriate management measures can be recommended.

Skimming and management of tree populations

In the absence of management plans, selective commercial logging has led to over-exploitation of some valuable species (redwoods such as mahogany, sipo, sapelli or lighter woods such as okoumé) and low exploitation of (many) others (Karsenty, 2004). This selective extraction, combined with poor regeneration, low growth rates, late seed maturity and poor seed dispersal, is leading to genetic erosion in some *Entandrophragma* species which is threatening the genetic quality of populations, at least in some countries (Lemmens *et al.*, 2010). In the specific case of *E. cylindricum*, Lourmas *et al.* (2007) showed that the reduction in the number of seed trees following logging is resulting more in a regeneration deficit than in a problem of genetic diversity. This deficit of future stems compromises logging sustainability if no specific management system is applied (Sépulchre *et al.*, 2008). Felling restrictions (e.g. increasing minimum cutting diameters) in order to conserve seed trees and provide “assistance” for regeneration are among the corrective measures recommended (Owona Ndongo, 2006; Lourmas *et al.*, 2007; Sépulchre *et al.*, 2008; Doucet *et al.*, 2016). In this context, ecological studies on *Entandrophragma* regeneration should be carried out by comparing recently logged forests with unlogged or formerly logged forests in order to better understand the reproductive processes (flowering and fruiting phenology, pollen and seed dispersal in subsequent work by Lourmas *et al.* (2007) and Monthe *et al.* (2017) as well as the ecological conditions determining seedling establishment, survival and growth and the biotic and abiotic risks they present.



Photo 4.
Stem of *Entandrophragma angolense* in the Yangambi Biosphere Reserve.
Photo M. Devriendt.

Sustainable management policy, legislation and regulation

Categorization and implementation of sustainable management systems

The operational implementation of sustainable management systems for tropical forests focuses on a relatively small number of categories, i.e. in the majority of cases, management systems aim to improve either industrial and artisanal forestry (forest management, low impact logging, forest certification, reforestation, etc.) or to reinforce carbon storage (Clean Development Mechanism - CDM/Forests, REDD, etc.) or, finally, to increase the involvement of local populations in forest management and use (participatory management, community-based management, etc.; Leroy *et al.*, 2011). Currently, these three categories tend to overlap. Effective implementation of these tools or regulatory instruments would make it possible to strengthen the sustainable management of forest species. Some management tools designed to improve forest management (artisanal and industrial logging methods) and to increase wood and carbon stocks (reforestation policy) of *Entandrophragma* are discussed in the following section.



Photo 5.
Entandrophragma utile stem in the Yangambi Biosphere Reserve.
Photo M. Devriendt.

Effective implementation of forest management plans

Sectoral approach extended to the valuation of wood and carbon stocks

In Central Africa, studies for the implementation of forest management plans (FMPs) were developed in the 1990s (Marien and Mallet, 2004). In theory, FMPs assess the potential of the resource, take into account the trade-offs between ecological, economic and social aspects and propose balanced solutions (Cerutti *et al.*, 2017). In practice, forest management must ensure the conservation of resources as well as the well-being of the population, and forestry must provide the technical solutions (Dupuy, 1998). In addition, implementing an FMP is also an opportunity to reduce forest carbon emissions while presenting forest enterprises with acceptable financial trade-offs (Cerutti *et al.*, 2017).

Sustained attention to a few specific rules and actions

To avoid compromising regeneration and to boost the dynamics of a logged forest, Fargeot *et al.* (2004) propose giving priority to two management instruments or tools: the duration of the rotation, which is based in particular on economic and auto-ecological considerations, and the determination of minimum diameters in exploitable areas that take into account, at least ideally, ecological and technical imperatives. In addition to low-impact extraction techniques, these two management tools must be included in the effective implementation of FMPs. According to Karsenty (2004), the absence of management rules can raise serious problems for the renewal of the resource in unmanaged concessions but also, and probably above all, in forests where informal artisanal logging takes place. The renewal of over-exploited commercial *Entandrophragma* species will therefore require the development, validation and implementation of PAFs and compliance with them. Sustainable forest management is also relevant to the certification of good forest management (FSC, African Forest Certification Programme -AFCP-, etc.) or legality (Timber Origin and Legality -OLB-, Timber Legality & Traceability Verification -TLTV-, Verification of Legal Origin/Compliance -VLO/VLC-, etc.) (Karsenty and Ferron, 2017). To achieve this, Bayol *et al.* (2010) suggest building the capacity of forest law enforcement institutions in a context of strengthened rule of law (i.e. through strict law enforcement) when forest concessions are not managed or are slow to use the management tools discussed above.

Revision of minimum logging diameters

The Minimum Logging Diameter (MLD), the legal threshold at which a tree can legally be felled, for *Entandrophragma* species varies from country to country (table V). Côte d'Ivoire, where *Entandrophragma* species have been over-exploited since the 1960s, had set the MLE at the lowest level: 60 cm. In contrast, Ghana has set the MLD for all *Entandrophragma* species at the

highest level: 110 cm. Ghana, Cameroon and Liberia are the three countries that have increased the MLD for sapelli (to 110 cm, 100 cm and 90 cm respectively) in order to improve the rate of recovery of the resource. The MLD for kosipo has been set at 80 cm by all central African exporting countries.

The regular fruiting diameter (RFD), the threshold at which efficient and regular fruiting takes place, is one of the important parameters to be taken into account to ensure logging sustainability. The RFD-MLD comparison (table VI) helps to assess the risk of shortage of seed trees and their regeneration. In order to avoid too great a reduction in the number of seed trees, it is necessary to ensure that RFD-MLD are significantly larger than the regular fruiting diameters (Durrieu de Madron *et al.*, 2004; S epulchre *et al.*, 2008; Tchinda, 2008; Mujuni, 2008; Nyunai, 2008; K ezeum e, 2008; Da inou and Doucet, 2010). As future harvest is a function of the size of the diameter classes below the DME and of increment, logging damage and mortality (Durrieu de Madron and Forni, 1997), it is important to revise the regulation on the *Entandrophragma* DME by formalising an increase in RFD in all African producer countries. Fargeot *et al.* (2004) show that, for the same rotation period, a simple increase in MLD demands the maintenance of larger standing trees and increases the production of exploitable wood

from the forest. This regulatory requirement should apply to all forest concession holders, including those who do not yet have MFPs and should therefore not be allowed to log. As part of a commitment to sustainable management, states should cancel the contracts of concession holders who do not yet have an MFP after the 3-year interim agreement to produce one.

Regulation of artisanal and informal logging

In the Congo Basin, the domestic timber market is growing strongly in terms of quantity, but the low purchasing power of the populations and the absence of client demands in terms of resource management mean that this market is almost systematically geared to the informal and/or illegal sector (Bayol *et al.*, 2014), so much so that log production in the informal sector may even exceed production in the formal sector (Bayol *et al.*, 2012). Recent studies in Cameroon, Gabon, CAR and DRC by Lescuyer *et al.* (2012) show that the domestic market for wood from artisanal, often informal, sawmills has reached an overall annual production of about 1.25 million m³ of processed products, higher than in the controlled industrial sector. All these studies show that artisanal operators consider *Entandrophragma*, and some other species (e.g. *Khaya anthotheca* (Welw.) C. DC., *Pericopsis elata* (Harms) Meeuwen, *Pterocarpus soyauxii* Taub., *Milicia excelsa* (Welw.) C.C. Berg.), as noble woods and target them specifically (Tshimpanga *et al.*, 2016). To improve the safety of artisanal logging, increase its contribution to the national economy and control its environmental impacts, Tiayon and Molnar (2012) recommend better control and formalization of the artisanal sawmilling sector.

Need to strengthen reforestation policy and measures

According to Marien and Mallet (2004), central African countries began to study possibilities for enriching their forest heritage in 1934, by planting arboretums in Mbuku Nsitu in the Mayombe massif (Congo), in Sibang outside Libreville (Gabon) and several other sites (Mbalmayo in Cameroon, Yangambi in DRC). State programmes were then set up to enrich these arboreta by planting commercially valuable species (sipo, sapelli, etc.) along the forest inventory strips in natural forests being logged in northern Congo, Cameroon and DRC (Yangambi). These programmes were abandoned fairly quickly and replaced by, for example, plantations of exotic species or okoum e. On a more modest scale, some peasant farmers in western Cameroon, for example, are planting kosipo in their hedgerows, which is considered as a natural forest species producing long rotation wood (Temgoua *et al.*, 2011).

In C ote d'Ivoire, when the deforestation rate reached 600,000 ha/year during the 1960-1970 decade, the country turned to reforestation, which was in full swing (Alexandre, 1982) when programmes to enrich natural forests had already been abandoned. The lack of knowledge of natural regeneration mentioned by Catinot (1965), still poorly mastered to date (Doucet *et al.*, 2016), is one of the obstacles to extensive techniques for renewing and enriching natural forest capital.



Photo 6.
Measuring the increase in diameter of a trunk
of *Entandrophragma cylindricum*.
Photo M. Devriendt.

Table VI.

Minimum Fruiting Diameter (MFD), Regular Fruiting Diameter (RFD) and Minimum Logging Diameter (MLD) of *Entandrophragma* tree species.

RC: Republic of the Congo; Cam: Cameroun; DRC: Republic Democratic of the Congo; CAR: Central African Republic; CI: Côte d'Ivoire. (Source: Kasongo Yakusu *et al.*, 2018).

Species	Scientific name	MFD (cm)	RFD (cm)	MLD (cm)	Country	Reference	
Kosipo	<i>Entandrophragma candollei</i>	40	–	80	CAR	Yalibanda, 1999	
		–	85	70	Uganda	Plumptre, 1995	
		–	–	110	–	Ghana	Nyunaï, 2008
				90		Liberia	
				60		CI	
				80		Gabon	
				–		RC	
				–		Cam	
				–		DRC	
				–		–	
Sapelli	<i>Entandrophragma cylindricum</i>	–	75	80	CAR	Durrieu de Madron and Daumeurie, 2004	
		–	85	–	Uganda	Plumptre, 1995	
		35	–	80	CAR	Petrucci <i>et al.</i> , 1995	
		55	–	80	CAR	Yalibanda, 1999	
		40	55	90	Gabon	Sépulchre <i>et al.</i> , 2008	
		–	–	60	–	CI	Palla <i>et al.</i> , 2002
				110		Ghana	
				90		Liberia	
				80		RC	
				100		Cam	
80	DRC						
Sipo	<i>Entandrophragma utile</i>	–	85	90	Gabon	Sépulchre <i>et al.</i> , 2008	
		–	–	110	Ghana	Mujuni, 2008	
				100	Cam		
				90	Liberia		
				60	CI		
				80	RC		
				80	DRC		
				80	CAR		
				–	–		–
		Tiama	<i>Entandrophragma angolense</i>	55	–	80	CAR
50	–			80	CAR	Yalibanda, 1999	
–	85			–	Uganda	Plumptre, 1995	
–	–			110	–	Ghana	Tchinda, 2008
				90		Liberia	
				60		CI	
				80		Gabon	
				80		RC	
				80		Cam	
				80		DRC	

–: no information.

In terms of forest plantations, strengthening of reforestation policies should take into account the multiple causes of failure identified by Marien and Gourlet-Fleury (2014): insufficient or faulty prior strategic analyses, approximate or unsustainable technical schemes, poor appreciation of social issues, failure to resolve land tenure issues (long-term security of land tenure, pressure for other uses, real estate or agricultural speculation), poor economic calculations, insufficiently documented environmental impacts, insufficient long-term financing, etc. To limit the depletion of over-exploited species, West and Central African countries do not have sufficient means to invest in large-scale plantations that will produce exploitable trees within a few decades. Developing agroforestry systems would make it possible to secure an annual income (e.g. from cocoa and coffee) and a one-off gain from logging over a longer period.



Photo 7.
Base of a stem of *Entandrophragma angolense*
in the Yangambi Biosphere Reserve.
Photo M. Devriendt.

Conclusion and research perspectives

This review of issues that arise for improvements in the management of the *Entandrophragma* genus in natural forests shows that this taxon is of significant economic interest, which has resulted in over-exploitation, both industrial and artisanal, initially in West Africa and now concentrated in Central Africa. Limited natural regeneration, moderate or low growth rates, failure to use low-impact logging techniques and especially the absence of MFPs or only partial and/or uncontrolled implementation, together with selective and intensive extraction are all threatening natural populations of *Entandrophragma*. These threats are also leading to genetic erosion of the genus, to a greater or lesser extent depending on regions. The multiple uses made of these species are a potential source of conflicts between stakeholders, populations and industrialists. If forest managers do not involve local populations (inclusive management) and do not respect their fundamental social rights and their rights to use the forest (e.g. for food and medicines), it is impossible to set up viable MFPs.

Furthermore, the environmental impacts caused by the skimming of *Entandrophragma* populations are poorly documented for industrial logging, and virtually ignored for artisanal logging. Because of this situation, the sustainability of these forest resources is coming more acutely into question, since the management tools that could mitigate the problem need to be analysed from an overall and interactive perspective to ensure their viability. These tools include the regulation and/or improvement of industrial and artisanal logging (e.g. regulation of MLDs and effective control of the artisanal sector), improvement of carbon storage (e.g. by reforestation) and greater involvement of local populations by promoting inclusive management to develop the traditional pharmacopoeia, caterpillar collection, reforestation policy (and measures), etc. The scientific studies that would make it possible to strengthen management guidelines and measures for commercial *Entandrophragma* species are still fragmentary and do not cover the entire range of the genus. For example, in DRC, where the greatest diversity of *Entandrophragma* species is found and where the main species are logged industrially and by small-scale operators, very few recent scientific studies have been undertaken. A number of topics need in-depth studies to improve the management of these species for sustainability and to update their conservation status (currently recognised as “vulnerable”) according to their geographical distribution. To achieve this, more research is needed on the following in particular:

- Growth rings analysis to measure growth rates (e.g. as affected by climate change, by analysing the relationship between ring widths and rainfall) and studies of stable oxygen isotopes ($\delta^{18}O$) for climate reconstructions;
- analysis of diametric growth through measurements based on larger numbers of trees across their entire range;

- anatomical and technological properties to justify priority measures for sustainable management (e.g. reforestation, integration into forestry schemes and controlling the illegal timber trade);
- updating the geographical distribution of each of the main commercial species;
- the processes involved in the natural regeneration of species, particularly in logging areas;
- reproductive processes (flowering and fruiting phenology, pollen and seed dispersal);
- impacts of human activities (industrial and artisanal extraction) and the environment (e.g. climate change);
- evaluating the evolution of production stocks, biomass and carbon;
- harmonisation of forestry policies within the producer countries of valuable *Entandrophragma* timber aimed at improving their sustainable management.

Acknowledgements

The authors would like to thank the European Union for the financial assistance to this study through the “FCCC” project, implemented by CIFOR at the University of Kisangani, and the Royal Museum of Central Africa for the “ABIC” scientific internship grant (2016, 2017, 2018) in Belgium. They also thank all the readers and reviewers behind the scenes for their contributions to the improvement of the final version of this article and all those who provided any assistance in researching and compiling the information related to this publication.

References

Adler D., 1989. Natural forest increment, growth and yield. *In*: Wong J. L. G. (ed.). Ghana forest inventory project seminar proceedings. London, United Kingdom, Overseas Development Administration, Accra, Ghana, Forestry Department, 47-52.

Alexandre D.-Y., 1982. Aspects de la régénération naturelle en forêt dense de Côte-d'Ivoire. *Candollea*, 37 : 579-588. <https://core.ac.uk/download/pdf/39875069.pdf>

ATIBT (Association technique internationale des bois tropicaux), 1986. Atlas des bois tropicaux. Tome I. Afrique. Paris, France, ATIBT, 240 p.

Bayol N., Anquetil F., Bile C., Bollen A., Bousquet M., Castadot B., *et al.*, 2014. Filière bois d'œuvre et gestion des forêts naturelles : les bois tropicaux et les forêts d'Afrique centrale face aux évolutions des marchés. *In* : De Wasseige C., Flynn J., Louppe D., Hiol Hiol F., Mayaux Ph. (éds). Les forêts du bassin du Congo – État des forêts 2013. Neufchâteau, Belgique, Weyrich, 47-66.

Bayol N., Demarquez B., De Wasseige C., Eba'a R., Fisher J.-F., Nasi R., *et al.*, 2012. La gestion des forêts et la filière bois en Afrique Centrale. *In* : De Wasseige C., de Marcken P., Bayol N., Hiol Hiol F., Mayaux Ph., Desclée B., *et al.* (éds). Les forêts du bassin du Congo – État des forêts 2010. Luxembourg, Office des publications de l'Union européenne, 41-61.

Beeckman H., 2016. Wood anatomy and trait-based ecology. *IAWA Journal*, 37 (2): 127-151. <https://doi.org/10.1163/22941932-20160127>

Brazier J. D., Franklin G. L., 1961. Identification of hardwoods. A microscope key. *Forest Products Research Bulletin*, 46, 96 p.

Catinot R., 1965. Sylviculture tropicale en forêt dense africaine. *Bois et Forêts des Tropiques*, 100 : 5-18. <https://doi.org/10.19182/bft1965.100.a18965>

Catinot R., 2018. Tropical silviculture in dense African forest (Part 1). *Bois et Forêts des Tropiques*, 336 : 7-18. <https://doi.org/10.19182/bft2018.336.a31602>

Cerutti P. O., Suryadarma D., Nasi R., Forni E., Medjibe V., Delione S., *et al.*, 2017. The impact of forest management plans on trees and carbon: Modeling a decade of harvesting data in Cameroon. *Journal of Forest Economics*, 27: 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jfe.2017.01.004>

CFT (Compagnie forestière de transformation), 2015. Plan d'aménagement forestier. Superficie sous aménagement. Concessions 46/11 et 47/11. Kinshasa, République démocratique du Congo, CFT.

Cirad (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement), 2015. Les principales caractéristiques technologiques de 245 essences forestières tropicales. *Tropix 7.5.1*.

CITES (Convention pour le commerce international des espèces de faune et flore sauvages menacées d'extinction), 1983. Texte de convention. Version amendée à Gaborone. <https://cites.org/fra/disc/text.php> (consulté le 31/05/2017).

Couralet C., Sterck F. J., Sass-Klaassen U., Van Acker J., Beeckman H., 2010. Species-specific growth responses to climate variations in understory trees of a Central African rain forest. *Biotropica*, 42: 503-511. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2009.00613.x>

Dahms K.-G., 1999. Afrikanische Exporthölzer. 3. Auflage. Leinfelden-Echterdingen, Deutschland, DRW-Verlag, 358 p.

Dainou K., Doucet J.-L., 2010. Évaluation de l'aménagement et de l'état des populations des essences exploitées par le Groupe SEFAC. Wavre, Belgique, Nature +.

Dainou K., Bracke C., Vermeulen C., Haurez B., De Vleeschouwer J.-Y., Fayolle A., *et al.*, 2016. Hautes Valeurs de Conservation (HVC) dans les Unités Forestières d'Aménagement du Cameroun : concepts, choix et pratiques. Gembloux, Belgique, Presses agronomiques de Gembloux. <http://hdl.handle.net/2268/201957>

Dauby G., Zaiss R., Blach-Overgaard A., Catarino L., Damen T., *et al.*, 2016. RAINBIO: a mega-database of tropical African vascular plants distributions. *PhytoKeys*, 74: 1-18. <https://doi.org/10.3897/phytokeys.74.9723>

Détienne P., Mariaux A., 1977. Nature et périodicité des cernes dans les bois rouges de Méliacées africaines. *Bois et Forêts des Tropiques*, 175 : 29-37. <https://doi.org/10.19182/bft1975.159.a19269>

Détienne P., Oyono F., Durrieu L., Demarquez B., Nasi R., 1998. L'analyse des cernes : applications aux études de croissance de quelques essences en peuplements naturels de forêt dense africaine. Montpellier, France, Cirad-Forêt.

Dibong S. D., Mpondo E., Ngoye A., Kwin M. F., 2011. Plantes médicinales utilisées par les populations Bassa de la région de Douala au Cameroun. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 5: 1105-1117. <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v5i3.72227>

Doucet J.-L., Kouadio Y. L., 2007. Le moabi, une espèce « phare » de l'exploitation forestière en Afrique centrale. *Parcs Réserves*, 62 (2) : 25-31. <http://hdl.handle.net/2268/22385>

Doucet J.-L., Dainou K., Ligot G., Ouédraogo D.-Y., Bourland N., Ward S.-E., *et al.*, 2016. Enrichment of Central African logged forests with high-value tree species: testing a new approach to regenerating degraded forests. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services and Management*, 12 (1-2): 83-95. <https://doi.org/10.1080/21513732.2016.1168868>

- Doumenge C., Coppens G., Chevallier M.-H., Todou G., Niangdouma R., Fauvet N., Chevillotte H., 2010. Évaluation des niches climatiques de quatre espèces d'*Entandrophragma* (Meliaceae) d'Afrique occidentale et centrale. Implications évolutives et paléoclimatiques. In : Jeannoda V. H., Razafimandimbison S. G., De Block P. (éds). XIX^e Congrès de l'AETFAT, 25-30 avril 2010, Antananarivo, Madagascar. Résumés. Scripta Botanica Belgica, 46 : 153.
- Dupuy B., 1998. Bases pour une sylviculture en forêt dense tropicale humide africaine. Montpellier, France, Cirad-Forêt, 329 p. <http://agritrop.cirad.fr/315216/>
- Durrieu de Madron L., Daumerie A., 2004. Diamètre de fructification de quelques essences en forêt naturelle centrafricaine. Bois et Forêts des Tropiques, 281 : 87-95. <https://doi.org/10.19182/bft2004.281.a20230>
- Durrieu de Madron L., Forni E., 1997. Aménagement forestier dans l'est du Cameroun : Structure du peuplement et périodicité d'exploitation. Bois et Forêts des Tropiques, 254 : 39-50. <https://doi.org/10.19182/bft1997.254.a19897>
- Durrieu de Madron L., Nasi R., Détienne P., 2000. Accroissements diamétriques de quelques essences en forêt dense africaine. Bois et Forêts des Tropiques, 263 : 63-73. <https://doi.org/10.19182/bft2000.263.a20062>
- Eckebil P. P. T., Verheggen F., Doucet J.-L., Malaisse F., Daïnou K., Cerutti P. O., et al., 2017. *Entandrophragma cylindricum* (Sprague) Sprague (Meliaceae), une espèce ligneuse concurrentielle en Afrique centrale (synthèse bibliographique). Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement, 21 : 80-97. <https://popups.uliege.be/1780-4507/index.php?id=13508>
- Fargeot C., Forni E., Nasi R., 2004. Réflexions sur l'aménagement des forêts de production dans le bassin du Congo. Bois et Forêts des Tropiques, 281 : 19-34. <https://doi.org/10.19182/bft2004.281.a20223>
- Fétéké F., Fayolle A., Daïnou K., Bourland N., Dié A., Lejeune P., et al., 2016. Variations saisonnières de la croissance diamétrique et des phénologies foliaire et reproductive de trois espèces ligneuses commerciales d'Afrique centrale. Bois et Forêts des Tropiques, 330 : 3-21. <https://doi.org/10.19182/bft2016.330.a31315>
- Fétéké F., Perin J., Fayolle A., Daïnou K., Bourland N., Kouadio Y.-L., et al., 2015. Modéliser la croissance de quatre essences pour améliorer la gestion forestière au Cameroun. Bois et Forêts des Tropiques, 325 : 5-20. <https://doi.org/10.19182/bft2015.325.a31269>
- Fischer E., Rembold K., Althof A., Obholzer J., Malombe I., Mwachala G., et al., 2010. Annotated checklist of the vascular plants of Kakamega Forest, Western Province, Kenya. Journal of East African Natural History, 99 (2): 129-226. <https://doi.org/10.2982/028.099.0205>
- Geist H., Lambin E., 2002. Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation. BioScience, 52 (2): 143-150. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0143:PCAUDF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0143:PCAUDF]2.0.CO;2)
- Gérard J., 1999. Comportement et caractéristiques technologiques des bois de forêt naturelle : évolution des méthodes d'étude en relation avec l'adéquation qualité-usages. In : Nasi R., Amsallem I., Drouineau S. (éds). La gestion des forêts densives africaines aujourd'hui. Actes du séminaire Forafri de Libreville, Gabon, 12-16 octobre 1998, Cirad-Forêt, Cifor, Forafri. Montpellier, France, Cirad-Forêt. <http://agritrop.cirad.fr/392132/>
- Gérard J., Edi Kouassi A., Daigremont C., Détienne P., Fouquet D., Vernay M., 1998. Synthèse sur les caractéristiques technologiques de référence des principaux bois commerciaux africains. Montpellier, France, Cirad-Forêt, Série Forafri, 11, 185 p. <https://agritrop.cirad.fr/315469/>
- Gérard J., Guibal D., Paradis S., Cerre J.-C., 2016. Atlas des bois tropicaux. Versailles, France, Éditions Quæ, coll. Guide pratique, 999 p.
- Gillet J.-F., Ngalouo B., Missamba-Lola A. P., 2008. Rapport d'analyse - volet dynamique forestière. Projet CIB FFEM « Suivi du programme dynamique forestière - agroforesterie - inventaires faunes ». Ministère de l'Économie forestière, République du Congo.
- Gillet P., Vermeulen C., Feintrenie L., Dessard H., Gracia M., 2016. Quelles sont les causes de la déforestation dans le bassin du Congo ? Synthèse bibliographique et études de cas. Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement, 20 (2) : 183-194.
- 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.
- Hall J. S., 2008. Seed and seedling survival of African mahogany (*Entandrophragma* spp.) in the Central African Republic: Implications for forest management. Forest Ecology and Management, 255: 292-299. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.09.050>
- IAWA (International Association of Wood Anatomists) Committee, 1989. List of microscopic features for hardwood identification. IAWA Bulletin, new series (4th printing, 2007), 10: 219-332.
- ITTO (International Tropical Timber Organization), 2017. Tropical Timber Market (TTM) Report. ITTO Market Information Service (MIS), volume 21, number 23, 1st-15th December 2017.
- Jagoret P., Kwesseau J., Messie C. A., Michel I., Malézieux E., 2014. Valeurs d'usage des ligneux utilisés en agroforesterie : les cacaoyères du Centre-Cameroun. Bois et Forêts des Tropiques, 321: 45-54. <https://doi.org/10.19182/bft2014.321.a31217>
- Karsenty A., 2004. Enjeux des réformes récentes de la fiscalité forestière dans le bassin du Congo. Bois et Forêts des Tropiques, 281 : 51-60. <https://doi.org/10.19182/bft2004.281.a20227>
- Karsenty A., Ferron C., 2017. Recent evolutions of forest concessions status and dynamics in Central Africa. International Forestry Review, 19: 10-26. <https://doi.org/10.1505/146554817822295957>
- Karsenty A., Ongolo S., 2012. Les terres agricoles et les forêts dans la mondialisation : de la tentation de l'accaparement à la diversification des modèles ? In : Agriculture et alimentation : des champs géopolitiques de confrontation au XXI^e siècle. Cahier Demeter, 13 : 99-108. <http://agritrop.cirad.fr/563526/>
- Karsenty A., Vermeulen C., 2016. Vers des Concessions 2.0 - Articuler gestion inclusive et exclusive dans les forêts de production en Afrique centrale. In : Buttoud G., Nguingui J. C., Aubert S., Bakouma J., Karsenty A., Kouplevatskaya-Buttoud I., Lescuyer G. (éds). La gestion inclusive des forêts d'Afrique centrale : de la participation au partage des pouvoirs. Libreville, Gabon, FAO, Cifor, 205-223. <http://hdl.handle.net/2268/198501>
- Kasongo Yakusu E., Monthe F. S., Bourland N., Hardy O. J., Louppe D., Bola Mbele Lokanda F., et al., 2018. Le genre *Entandrophragma* (Meliaceae) : taxonomie et écologie d'arbres africains d'intérêt économique (synthèse bibliographique). Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement, 22 (2). <https://popups.uliege.be/443/1780-4507/index.php?id=16353>.
- Kémeuzé V. A., 2008. *Entandrophragma cylindricum* (Sprague) Sprague. In : Louppe D., Oteng-Amoako A. A., Brink M. (éds). Ressources végétales de l'Afrique tropicale 7 (1). Bois d'œuvre 1. Traduction de : Plant Resources of Tropical Africa 7 (1). Timbers 1. 2008. Wageningen, Pays-Bas, Fondation PROTA, 268-273. <https://www.prota4u.org/database/Entandrophragmacylindricum> (consulté le 17/06/2016). <http://edepot.wur.nl/417632>
- Lebacqz L., Istas J. R., 1950. Les bois des Méliacées du Congo Belge. Volume 2. Tervuren, Belgique, Annales du Musée du Congo Belge, 127 p.

- Lemmens R. H. M. J., 2008. *Entandrophragma excelsum* (Dawe & Sprague) Sprague. In : Louppe D., Oteng-Amoako A. A., Brink M. (éds). Ressources végétales de l'Afrique tropicale 7 (1). Bois d'œuvre 1. Traduction de : Plant Resources of Tropical Africa 7 (1). Timbers 1. 2008. Wageningen, Pays-Bas, Fondation PROTA, 273-280. <http://edepot.wur.nl/417632>
- Lemmens R. H. M. J., Omino E. A., Bosch C. H., et al., 2010. Bois d'œuvre de l'Afrique tropicale. Conclusions et recommandations basées sur PROTA 7 (1) : Bois d'œuvre 1. Traduction de : Timbers of Tropical Africa. Conclusions and recommendations based on PROTA 7 (1): Timbers 1. 2009. Nairobi, Kenya, Fondation PROTA, 92 p.
- Leroy M., Vendé J., Aubert P. M., Espinosa L., Leménager T., 2011. Concept et dispositifs de gestion durable des forêts tropicales : une analyse critique de la prise en charge des enjeux environnementaux. Actes du colloque SIFFE, Yaoundé, Cameroun. http://www.siffee.org/static/uploaded/Files/ressources/actes-des-colloques/yaounde/pleniere-2-2/2_LEROY_DERROIRE_TXT.pdf (consulté le 05/12/2017).
- Lescuyer G., Cerutti P. O., Essiane E., Ebaa R., Nasi R., 2012. Évaluation du secteur du sciage artisanal dans le bassin du Congo. In : De Wasseige C., de Marcken P., Bayol N., Hiol Hiol F., Mayaux P., Desclée B., Nasi R., et al. (éds). Les forêts du bassin du Congo – État des forêts 2010. Luxembourg, Office des publications de l'Union européenne.
- Lisingo J., Lokinda F., Wetsi J.-L., Ntahobavuka H., 2012. Exploitation artisanale du bois et des chenilles comestibles par les habitants de la ville de Kisangani et ses environs. In : Benneker C., Assumani D.-M., Maïndo A., Bola F., Kimbuani G., Lescuyer G., et al. (éds). Le bois à l'ordre du jour. Exploitation artisanale de bois d'œuvre en RD Congo : Secteur porteur d'espoir pour le développement des petites et moyennes entreprises. Wageningen, Pays-Bas, Tropenbos International, 248-262.
- Louppe D., 2015. Anatomie des bois. In : Mille G., Louppe D. (éds). Mémento du forestier tropical. Versailles, France, Éditions Quæ, 859-867.
- Louppe D., Oteng-Amoako A. A., Brink M. (éds), 2008. Ressources végétales de l'Afrique tropicale 7 (1). Bois d'œuvre 1. Traduction de : Plant Resources of Tropical Africa 7 (1). Timbers 1. 2008. Wageningen, Pays-Bas, Fondation PROTA, 785 p.
- Louppe D., Ouatarra N., 2013. Étude sur l'exploitation forestière et les contraintes d'une gestion des forêts dans le domaine rural en Côte d'Ivoire. Abidjan, Côte d'Ivoire, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), 216 p.
- Lourmas M., Kjellberg F., Dessard H., Joly H. I., Chevallier M. H., 2007. Reduced density due to logging and its consequences on mating system and pollen flow in the African mahogany *Entandrophragma cylindricum*. Heredity, 99: 151-160. <https://www.nature.com/articles/6800976>
- Marien J.-N., Gourlet-Fleury S., 2014. Les plantations forestières en Afrique centrale : des sylvicultures nouvelles pour répondre aux nouveaux besoins des sociétés. In : De Wasseige C., Flynn J., Louppe D., Hiol Hiol F., Mayaux Ph. (éds). Les forêts du bassin du Congo – État des forêts 2013. Neufchâteau, Belgique, Weyrich, 197-212. http://www.observatoire-comifac.net/docs/edf2013/FR/EDF2013_FR_chap8.pdf
- Marien J.-N., Mallet B., 2004. Nouvelles perspectives pour les plantations forestières en Afrique centrale. Bois et Forêts des Tropiques, 282 : 67-79. <https://doi.org/10.19182/bft2004.282.a20221>
- Mate J.-P., Lusuna M., Nshimba H., Ndjele L., 2013. Les essences forestières à charbon de bois aux environs de Kisangani. In : Marien J.-N., Dubiez E., Louppe D., Larzillière A. (éds). Quand la ville mange la forêt. Les défis du bois-énergie en Afrique centrale. Versailles, France, Éditions Quæ, 159-166.
- Meunier Q., Mombogou C., Doucet J.-L., 2015. Les arbres utiles du Gabon. Gembloux, Belgique, Presses agronomiques de Gembloux, 340 p. <http://hdl.handle.net/2268/183815>
- Monthe F. K., Duminil J., Kasongo Yakusu E., Beeckman H., Bourland N., et al., 2018. The African timber tree *Entandrophragma congoense* (Pierre ex De Wild.) A.Chev. is morphologically and genetically distinct from *Entandrophragma angolense* (Welw.) C.DC. Tree Genetics & Genomes, 14: 66. <https://doi.org/10.1007/s11295-018-1277-6>
- Monthe F. K., Hardy O. J., Doucet J.-L., Loo J., Duminil J., 2017. Extensive seed and pollen dispersal and assortative mating in the rain forest tree *Entandrophragma cylindricum* (Meliaceae) inferred from indirect and direct analyses. Molecular Ecology, 26: 5279-5291. <https://doi.org/10.1111/mec.14241>
- Mujuni D. B., 2008. *Entandrophragma utile* (Dawe & Sprague) Sprague. In : Louppe D., Oteng-Amoako A. A., Brink M. (éds). Ressources végétales de l'Afrique tropicale 7 (1). Bois d'œuvre 1. Traduction de : Plant Resources of Tropical Africa 7 (1). Timbers 1. 2008. Wageningen, Pays-Bas, Fondation PROTA. <https://www.prota4u.org/database/Entandrophragmautile> (consulté le 17/06/2016).
- Nanson A., 2004. Génétique et amélioration des arbres forestiers. Gembloux, Belgique, Presses agronomiques de Gembloux, 712 p.
- Nyunaï N., 2008. *Entandrophragma candollei* Harms. In : Louppe D., Oteng-Amoako A. A., Brink M. (éds). Ressources végétales de l'Afrique tropicale 7 (1). Bois d'œuvre 1. Traduction de : Plant Resources of Tropical Africa 7 (1). Timbers 1. 2008. Wageningen, Pays-Bas, Fondation PROTA. <https://www.prota4u.org/database/Entandrophragmacandollei> (consulté le 17/06/2016).
- Owona Ndongo P.-A., 2006. Évaluation de la potentialité des plantations forestières au Centre-Sud Cameroun : Résultats des mesures effectuées dans l'arboretum de Mbalmayo et des enquêtes menées en périphérie de sa réserve. Mémoire de stage, Cirad, France.
- Onifade A. K., 2006. Effect of essential oils of some Meliaceae plants on aflatoxin production and growth of *Aspergillus parasiticus*. Journal of Food Technology, 4: 322-324. <http://medwell-journals.com/abstract/?doi=jftech.2006.322.324>
- Owona Ndongo P.-A., Peltier R., Linjouom I., Louppe D., Smektala G., Beligné V., et al., 2009. Plantations de bois d'œuvre en zone équatoriale africaine : cas de l'arboretum de l'Enef de Mbalmayo au sud du Cameroun. Bois et Forêts des Tropiques, 299 : 37-48. <https://doi.org/10.19182/bft2009.299.a20421>
- Palla F., Louppe D., Forni E., 2002. Sapelli. Fiche technique, écologique et sylvicole. Montpellier, France, Cirad-Forêt.
- Petrucchi Y., Tandeau de Marsac G., Morel P. J., 1995. Évolution du peuplement adulte et de la régénération acquise après interventions sylvicoles. Dispositif de recherche en forêt dense de Boukoko-La Lolé. Appui à la recherche forestière FAC/ARF. Bangui, République centrafricaine, Ministère des Eaux, Forêts, Chasse et Pêche, 55 p.
- Plumptre A. J., 1995. The importance of "seed trees" for the natural regeneration of selectively logged tropical forest. Commonwealth Forestry Review, 74: 253-258.
- Poorter L., Bongers F., Kouamé F. Y. N., Hawthorne W.-D., 2014. Biodiversity of West African Forests: An Ecological Atlas of Woody Plant Species. Wallingford, United Kingdom, CABI Publishing, 521 p. <https://www.jstor.org/stable/42608376>
- Sépulchre F., Daïnou K., Doucet J.-L., 2008. Étude de la vulnérabilité de 18 essences ligneuses commerciales d'Afrique centrale reprises sur la liste rouge UICN. Gembloux, Belgique, Université des Sciences agronomiques de Gembloux. https://www.atibt.org/wp-content/uploads/2017/06/Etude_vulnerabilite_Gembloux_2008.pdf

Staner P., Gilbert G., 1958. Meliaceae. In : Robyns W., Staner P., Demaret F., Germain R., Gilbert G., *et al.* (éds). Flore du Congo Belge et du Rwanda-Urundi. Spermatophytes. Volume 7. Bruxelles, Belgique, Institut national pour l'étude agronomique du Congo belge (INEAC), 147-213.

Tailfer Y., 1989. La forêt dense d'Afrique centrale. Identification pratique des principaux arbres. Tome I. Approche forestière et morphologique. Québec, Canada, Agence de coopération culturelle et technique, Wageningen, Pays-Bas, Centre technique de coopération agricole et rurale.

Tchinda A. T., 2008. *Entandrophragma angolense* (Welw.) C.DC. In : Louppe D., Oteng-Amoako A. A., Brink M. (éds). Ressources végétales de l'Afrique tropicale 7 (1). Bois d'œuvre 1. Traduction de : Plant Resources of Tropical Africa 7 (1). Timbers 1. 2008. Wageningen, Pays-Bas, Fondation PROTA. <https://www.prota4u.org/database/Entandrophragmaangolense> (consulté le 17/06/2016).

Temgoua L., Njouka R., Peltier R., 2011. Plantations ingénieuses de bois d'œuvre par les paysans de l'Ouest-Cameroun. Bois et Forêts des Tropiques, 309 : 63-76. <https://doi.org/10.19182/bft2011.309.a20467>

Tiayon F., Molnar A., 2012. Perspectives comparatives de l'exploitation artisanale du bois en RD Congo : évolution des politiques et des pratiques. In : Benneker C., Assumani D.-M., Maindo A., Bola F., Kimbuni G., Lescuyer G., *et al.* (éds). Le bois à l'ordre du jour. Exploitation artisanale de bois d'œuvre en RD Congo : secteur porteur d'espoir pour le développement des petites et moyennes entreprises. Wageningen, Pays-Bas, Tropenbos International, 133-135.

Tieguhong J. C., Snook L., Taedoung H., Maukonen P., Tchataat M., Loo J., *et al.*, 2017. Beyond timber: balancing demands for tree resources between concessionaires and villagers. International Forestry Review, 19 (S2): 14. https://www.biodiversityinternational.org/index.php?id=244&tx_news_pi1%5Bnews%5D=9554

Tshimpanga P., Lescuyer G., Vlemincx J., Adebou B., Lokombe D., 2016. Utilité d'une typologie des exploitants artisanaux de bois pour contribuer à la formulation d'une politique publique en province Orientale (RD Congo). Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement, 20 : 468-481. <https://popups.uliege.be/1780-4507/index.php?id=13242>

IUCN (Union internationale pour la conservation de la nature), 2012. Catégories et Critères de la Liste rouge de l'IUCN : Version 3.1. Deuxième édition. Gland, Suisse, Cambridge, Royaume-Uni, IUCN, 32 p. Originellement publié en tant que IUCN Red List Categories and Criteria : Version 3.1. Second edition.

Van der Sleen P., Groenendijk P., Zuidema P. A., 2015. Tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ in African mahogany (*Entandrophragma utile*) records regional precipitation and can be used for climate reconstructions. Global and Planetary Change, 127: 58-66. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.01.014>

Vermeulen C., Schippers C., Ntoune M. F. D., Bracke C., 2009. Enjeux méthodologiques autour des produits forestiers non ligneux dans le cadre de la certification en Afrique centrale. Bois et Forêts des Tropiques, 300 : 69-78. <https://doi.org/10.19182/bft2009.300.a20416>

Wheeler E., Baas P., Gason P., 1989. IAWA List of Microscopic Features for Hardwood Identification. IAWA Journal, 10 (3): 219-332. <https://doi.org/10.1002/fedr.19901011106>

White F., 1986. La végétation de l'Afrique. Mémoire accompagnant la carte de végétation de l'Afrique. Paris, France, Orstom et Unesco. http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers11-06/24837.pdf

White L., Gasson P., 2008. Mahogany. Kew, United Kingdom, Kew Publishing, 99 p.

Yalibanda Y., 1999. Phénologie en forêt dense de Ngotto (Rca). Bilan de trois années d'observation. In : Nasi R., Amsallem I., Drouineau S. (éds). La gestion des forêts denses africaines aujourd'hui. Actes du séminaire Forafri de Libreville (Gabon), 12-16 octobre 1998. Montpellier, France, Cirad-Forêt, cédérom, 24 p. <http://agritrop.cirad.fr/392581/>

Kasongo Yakusu *et al.* – Author's contributions

Contributor role	Contributor names
Conceptualization	E. Kasongo Yakusu
Data Curation	E. Kasongo Yakusu, D. Louppe, F. Monthe, N. Bourland
Formal Analysis	E. Kasongo Yakusu
Funding Acquisition	J. Van Acker
Investigation	E. Kasongo Yakusu, N. Bourland
Methodology	E. Kasongo Yakusu, N. Bourland
Project Administration	E. Kasongo Yakusu, J. Van Acker, N. Bourland
Resources	E. Kasongo Yakusu, D. Louppe, F. Monthe, O.J. Hardy, F. Bola Mbele Lokanda, H. Beeckman, N. Bourland
Supervision	E. Kasongo Yakusu, W. Hubau, J. Van den Bulcke, J. Van Acker, H. Beeckman, N. Bourland
Validation	E. Kasongo Yakusu, D. Louppe, F. Monthe, O.J. Hardy, F. Bola Mbele Lokanda, W. Hubau, J. Van den Bulcke, J. Van Acker, H. Beeckman, N. Bourland
Visualization	E. Kasongo Yakusu
Writing – Original Draft Preparation	E. Kasongo Yakusu
Writing – Review & Editing	E. Kasongo Yakusu, D. Louppe, F. Monthe, O.J. Hardy, F. Bola Mbele Lokanda, W. Hubau, J. Van den Bulcke, J. Van Acker, H. Beeckman, N. Bourland

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

Kévin CANDELIER^{1,2}
Peggy MOUELLE³
Annie OCANA⁴
Mathilda BATTEUX³
Élisabeth MANZANARES⁵
Patrice CLAIR⁶
Ange ANSOUR⁷

Élèves au cœur du projet

Dans le cadre de ce projet « Savanturiers », deux classes de CP-CE1 ont collaboré avec des experts et spécialistes des arbres. Les élèves, Anaya, Dhélia, Félix, Junaid, Louna, Manel, Marwa, Mériame, Youssef, Walid, Johise, Jihane, Talha, Mohamed, Neila, Rahma, Ylona, Valéry, Ania, Ismail, Sultan et Aïda, se sont ainsi initiés à la démarche de la recherche en s'intéressant aux rôles de la sève et de la résine dans l'arbre, puis à la croissance de ce dernier. Ils ont toutes et tous été partie prenante quant à l'élaboration de leur questionnement scientifique, des pistes de réflexion et des essais mis en place. Pour finir, ils ont œuvré collectivement à l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus, de façon à les présenter et les diffuser de manière efficace, comme le met en avant cet article.

¹ CIRAD
UPR BioWooEB
34398 Montpellier
France

² BioWooEB
Univ Montpellier, CIRAD
Montpellier, France.

³ École élémentaire Albert Camus
6 allée Lafayette
60100 Creil
France

⁴ Guide nature et patrimoine
labélisée Valeurs Parc naturel régional Oise-Pays
de France
48 rue d'Hérivaux, BP 6
60560 Orry-la-Ville
France

⁵ Collège Gabriel Havez
Réseau REP+ Oise
Boulevard Gabriel Havez
BP 110
60100 Creil
France

⁶ Collège Jean-Jacques Rousseau
Réseau REP Oise
Ligue des Savanturiers creillois
3 rue du Valois, BP 122
60100 Creil
France

⁷ Savanturiers-École de la recherche
Centre de recherches interdisciplinaires
8 bis rue Charles V
75004 Paris
France

Auteur correspondant / Corresponding author:
Kévin CANDELIER – kevin.candelier@cirad.fr

Accompagner la découverte scientifique des arbres par de jeunes élèves (Creil, France)



Photo 1.

Rencontre entre les élèves et le mentor scientifique. À ce stade, l'ensemble des acteurs du projet analysent et interprètent les premiers résultats obtenus par les élèves à la faveur de leurs recherches bibliographiques, leurs sorties en forêt et leurs plantations réalisées en classe. Ici, la discussion tourne autour des insectes (ex. : termites) et des champignons qui peuvent s'attaquer au bois.
Meeting between the pupils and the scientific mentor. At this stage, all those involved in the project analyse and interpret the first results obtained by the pupils from their bibliographic research, their forest outings and their planting in class. Here, the discussion revolves around insects (e.g. termites) and fungi that can attack wood.
Photo É. Manzanares

Doi : 10.19182/bft2021.349.a36792 – Droit d'auteur © 2021, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 21 mai 2021 ; date d'acceptation : 17 mai 2021 ; date de publication : 1^{er} septembre 2021.



Licence Creative Commons :
Attribution - 4.0 International.
Attribution-4.0 International (CC BY 4.0)

Citer l'article / To cite the article

Candelier K., Mouelle P., Ocana A., Batteux M., Manzanares É., Clair P., Ansour A., 2021. Accompagner la découverte scientifique des arbres par de jeunes élèves (Creil, France). Bois et Forêts des Tropiques, 349 : 85-94. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2021.349.a36792>

RÉSUMÉ

Accompagner la découverte scientifique des arbres par de jeunes élèves (Creil, France)

Les enfants élaborent des représentations de la science et des scientifiques dès les premières années de l'école primaire. À ce niveau scolaire, les élèves qui participent à des activités expérimentales, encadrées par des enseignants et des scientifiques, bénéficient d'un autre regard sur la recherche et se projettent davantage dans les pratiques scientifiques. Avec l'appui du Centre de recherches interdisciplinaires, de la Cité éducative de Creil, et l'intervention d'un chercheur en sciences du bois, plusieurs classes des écoles élémentaires du Réseau d'éducation prioritaire de Creil se sont intéressées à la croissance des arbres, à la faveur d'un projet proposé par le dispositif « Savanturiers – École de la Recherche ». En se conformant à une séquence scientifique usuelle (observations, questionnements, bibliographies, élaboration des protocoles de recherche, recherche proprement dite, analyses et interprétations, conclusion et restitution), compatible avec les activités d'apprentissage en classe, enseignants et élèves se sont intéressés à la croissance des arbres. Leurs recherches se sont focalisées sur le rôle de la sève et de la résine dans l'arbre, mais aussi sur les manières dont les humains et d'autres êtres vivants peuvent transformer et valoriser ces substances naturelles produites par les arbres au cours de leur croissance. En combinant la recherche documentaire et l'appui pédagogique des enseignants, d'un chercheur et d'une guide nature, tout en favorisant le dialogue entre les élèves et ces intervenants, ce projet pédagogique innovant a rendu les élèves acteurs de leur propre apprentissage de la nature. Outre l'aspect scientifique lié à la croissance des arbres, les jeunes élèves ont développé leur curiosité, leur rigueur, leur esprit créatif et critique, notamment à la faveur d'une journée d'immersion en forêt et du suivi de très jeunes arbres en salle de classe. Enfin, les élèves ont su relier les connaissances acquises au cours de ce projet de pratique de la recherche à des questions environnementales d'actualité et d'intérêt commun telles que la photosynthèse et la captation du CO₂, les rôles des arbres et de la forêt pour la biodiversité, les humains et l'environnement.

Mots-clés : Savanturiers, pédagogie, démarche de recherche, sève, arbre, forêt, environnement, France.

ABSTRACT

Scientists helping schoolchildren to learn about trees (Creil, France)

Children start to develop representations of science and scientists from their very first years of primary school. Pupils taking part in experimental activities under the supervision of teachers and scientists at this stage in their schooling are able to benefit from a different view of research and tend to project themselves more readily into scientific practice. With support from the Centre for Interdisciplinary Research and the Creil Education Centre and the involvement of a wood science researcher, several primary school classes in the priority education network in Creil worked on a project about tree growth, developed by the “Savanturiers” (Knowledge Adventurers) initiative. Keeping to the classic scientific sequence adapted to classroom learning – observation, questions, bibliographies, development of research protocols, research proper, analysis and interpretation, conclusions and reporting – to work on tree growth, the teachers and pupils focused on the role of sap and resin in trees, but also on the ways in which humans and other living beings transform and use these natural substances produced by trees during their growth. By combining documentary research with the educational input of the teachers, a researcher and a nature guide while encouraging exchanges between all of the latter and the pupils, this innovative educational project helped these young pupils to become active rather than passive learners about nature: besides the scientific aspect of tree growth, it helped them to develop their sense of curiosity, intellectual discipline and creative and critical faculties, especially during a day-long immersive experience in a forest environment and when monitoring young saplings in the classroom. Finally, they were able to link what they had learned during this project about research practice with topical environmental subjects of general interest, such as photosynthesis, how plants capture CO₂ and the roles of trees and forests in biodiversity, human lives and the environment.

Keywords: *Savanturiers*, education, research methods, sap, tree, forest, environment, France.

RESUMEN

Aprendizaje científico sobre los árboles para jóvenes estudiantes (Creil, Francia)

Los niños elaboran representaciones de la ciencia y de los científicos desde los primeros años de la escuela primaria. En este estadio escolar, los alumnos que participan en actividades experimentales, dirigidas por profesores y científicos, cambian su perspectiva sobre la investigación y se implican más en las prácticas científicas. Con el apoyo del Centro de Investigaciones Interdisciplinarias de la Ciudad Educativa de Creil y la intervención de un investigador de ciencias de la madera, varias clases de escuelas primarias de la red de educación prioritaria de Creil se interesaron por el crecimiento de los árboles, en el marco de un proyecto propuesto por el plan « Savanturiers » (aventureros del saber). Siguiendo una secuencia científica estándar (observaciones, preguntas, bibliografía, elaboración de protocolos de investigación, investigación propiamente dicha, análisis e interpretaciones, conclusión y restitución) compatible con las actividades de aprendizaje en el aula, profesores y alumnos se interesaron por el crecimiento de los árboles. Sus investigaciones se centraron en el papel de la savia y la resina en el árbol, pero también en las formas en que los seres humanos y otros seres vivos pueden transformar y valorizar estas sustancias naturales producidas por los árboles a medida que crecen. Al combinar la investigación documental con el soporte pedagógico de los profesores, de un investigador y de un guía de naturaleza, al tiempo que se fomentaba el diálogo entre los alumnos y estos educadores, el innovador proyecto pedagógico convirtió a los alumnos en protagonistas de su propio aprendizaje sobre la naturaleza. Además de asimilar el aspecto científico del crecimiento de los árboles, los jóvenes estudiantes desplegaron su curiosidad, su rigor, su espíritu creativo y crítico, especialmente a través de una jornada de inmersión en el bosque y del seguimiento de árboles muy jóvenes en el aula. Finalmente, los alumnos fueron capaces de relacionar los conocimientos adquiridos durante este proyecto de investigación práctica con cuestiones medioambientales actuales de interés público (por ejemplo, la fotosíntesis y la captura de CO₂, el papel de los árboles y los bosques para la biodiversidad, los seres humanos y el medio ambiente).

Palabras clave: Savanturiers, pedagogía, proceso de investigación, savia, árbol, bosque, medio ambiente, Francia.

Introduction

Les enfants élaborent des représentations de la science et des scientifiques dès les premières années de l'école primaire. Ces représentations auront un poids prépondérant dans leur choix d'orientation à l'adolescence. Lafosse-Marin (2010) a montré que les jeunes élèves ayant participé à des activités pédagogiques avec un scientifique se projettent davantage dans les pratiques scientifiques authentiques et se défont du préjugé du chercheur solitaire enfermé dans un laboratoire. Par conséquent, le monde des scientifiques est rendu accessible aux élèves par le truchement du mentorat, tout en les faisant travailler à des projets dans lesquels ils se reconnaissent (Rahm, 2006).

Les apprentissages de la science à l'école primaire sont développés à partir d'objets matériels, langagiers et/ou conceptuels permettant la convergence d'enjeux didactiques et pédagogiques. Du point de vue de l'élève, il s'agit de passer par la découverte, la pratique et le dialogue avec la communauté scientifique pour apprendre. Pour l'enseignant, l'enjeu est de choisir les ressources matérielles et environnementales pour rendre l'apprentissage possible. Les apprentissages des sciences à l'école primaire constituent également des moyens et des jalons facilitant différents processus d'élaboration cognitive (Bisault, 2010), tels que la perception, la représentation, le langage, le raisonnement, la prise de décision, le comportement individuel et collectif. Selon ces stratégies cognitives et affectives d'éducation, l'élève joue un rôle primordial dans son apprentissage. Non seulement il est actif, mais il reste aussi constamment conscient de ce qui se passe à l'extérieur et à l'intérieur de lui. Les jeunes élèves ont donc besoin d'être encouragés et motivés pour développer leurs compétences cognitives. Selon cette démarche de pédagogie scientifique et active, telle que proposée par le dispositif « Savanturiers – École de la Recherche » (programme d'éducation par la recherche à l'école, développé par le Centre de recherches interdisciplinaires), les classes collaborent avec la communauté scientifique autour d'un sujet de recherche bien défini. Les élèves sont ainsi initiés à une démarche d'investigation qui développe la curiosité, la créativité, l'esprit critique et l'intérêt pour le progrès scientifique et technique.

L'école est essentielle au partage et à la circulation des connaissances. Elle forme et prépare les élèves à devenir des citoyens critiques et créatifs, à même de relever les défis de l'Anthropocène. Le modèle de l'éducation par la recherche permet de faire prendre conscience aux élèves que la culture scolaire est l'expression d'un savoir établi au sein des communautés scientifiques, dont ils deviennent dépositaires et responsables pour façonner le monde à venir. Grâce à cette approche, l'école assure son rôle de transmission des connaissances et invite les élèves à explorer comment les savoirs sont fabriqués et validés. L'éducation active par la recherche joue également un rôle majeur dans l'ensemble des processus par lesquels chaque élève régule son attention, choisit de s'informer, de planifier, de résoudre un problème, de repérer ses erreurs et les corriger, et de s'ouvrir au monde et à l'environnement qui l'entoure. L'élève s'engage ainsi dans son apprentissage avec confiance et enthousiasme.

Par le truchement des interactions multiples entre les différents acteurs de ce type de projet, il se positionne au centre de la démarche et en dynamise l'apprentissage individuel, collectif et collaboratif (Lafosse-Marin, 2004).

Le premier objectif de ce projet mis en place au sein de la classe est donc pédagogique. Il s'agit de répondre collectivement à des questions précises sur la croissance des arbres.

Le deuxième objectif est scientifique et vise à rendre l'élève responsable à l'égard de l'environnement. La nature représente un formidable terrain pédagogique. À l'extérieur, les enfants entreprennent des expériences directes et multisensorielles, ils prennent confiance, développent leurs compétences physiques, sociales, cognitives et émotionnelles. Cette méthode pédagogique, en lien avec la nature et la profession de chercheur, leur permet de se construire. Elle les invite à observer, imaginer, collaborer, créer, décrire, explorer, nommer, identifier, apprendre. Dans ce projet, l'arbre et la forêt sont les supports mis au service de l'apprentissage des jeunes élèves à la faveur d'interventions d'une guide nature et d'un chercheur en sciences du bois. Ce projet a pour but d'initier les jeunes élèves au domaine du vivant, en découvrant la croissance des arbres tout en enrichissant leur vocabulaire autour de la forêt et de la biodiversité. La finalité du projet est que les élèves prennent conscience de l'importance des arbres et de la forêt dans la biodiversité et le monde qui les entoure.

Méthodes

Le dispositif « Savanturiers – École de la Recherche »

Le dispositif « Savanturiers – École de la Recherche » est un programme éducatif développé par le Centre de recherches interdisciplinaires (CRI) qui œuvre pour la mise en place de l'éducation par la recherche à l'école. Ce dispositif mobilise et fédère les communautés éducatives et scientifiques (à travers différents thèmes de recherche participative tels que les sciences du cerveau, du climat, du numérique et technologies, de la santé, les sciences humaines et sociales, de l'univers, des villes et du vivant) aux niveaux national et international (figure 1), notamment dans les pays du Sud. Il propose des projets pédagogiques et des formations, et produit des ressources et des méthodologies pédagogiques. Les projets « Savanturiers – École de la Recherche » proposés par ce dispositif sont des projets d'éducation par la recherche, menés en classe par les élèves, orchestrés par un ou plusieurs enseignants, et qui portent sur un ou plusieurs champs d'investigation scientifique. La classe peut également être accompagnée par un référent scientifique (mentor) du domaine d'étude. Ces projets se réalisent en collaboration avec l'ensemble des acteurs concernés tels que musées, associations, sociétés scientifiques, chercheurs et artistes, jouant chacun le rôle de mentor (CRI Paris, 2020). Le dispositif « Savanturiers – École de la Recherche » collabore avec les enseignants et les chercheurs pour soutenir les classes dans des actions d'apprentissage d'une culture scientifique et de communication auprès de divers publics.

En mettant en place de tels projets scientifiques, une réflexion sur le savoir, la création de savoir et le pouvoir que procure la science est ainsi amorcée chez les élèves.

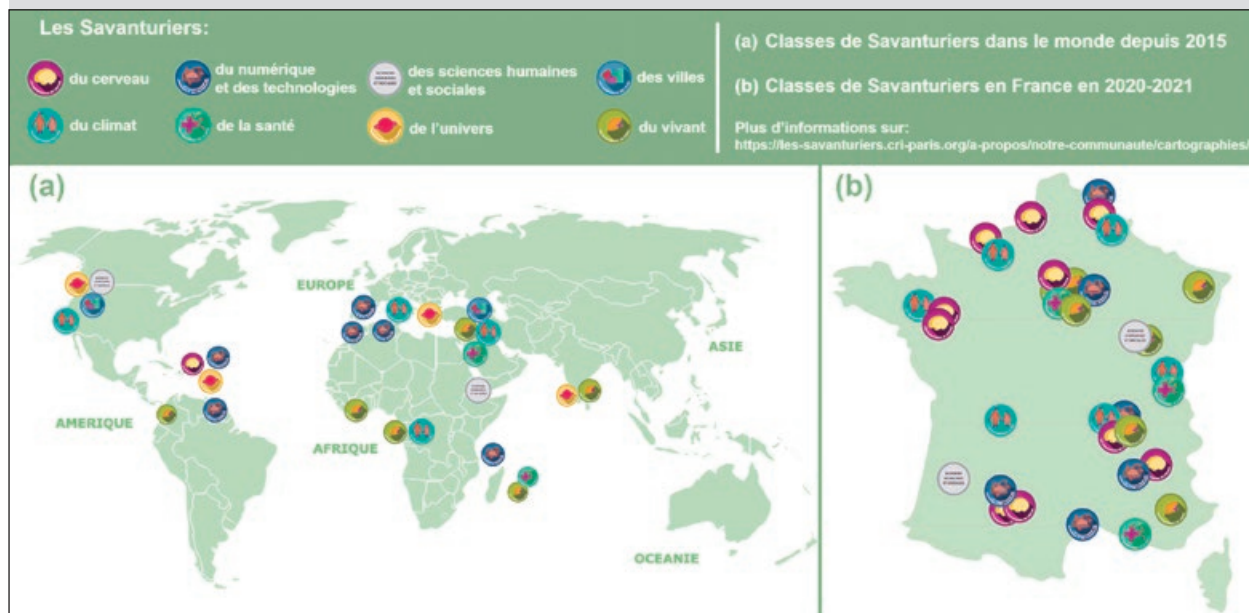


Figure 1.

Illustration des classes de France et d'ailleurs qui ont participé aux projets « Savanturiers », en fonction des thèmes de recherche participative proposés aux élèves et enseignants. (Données issues de Savanturiers, 2020.)

Illustration of the classes in France and elsewhere that have participated in the "Savanturiers" (Knowledge Adventurers) projects, according to the participatory research themes proposed to students and teachers. (Data from Savanturiers, 2020).

Mise en place de la démarche pédagogique

Le modèle de l'éducation par la recherche, expérimenté dans ce projet de recherche sur les arbres, a permis de mettre en place une forte collaboration entre les enseignants, les élèves et la communauté scientifique, représentée ici par une guide nature et patrimoine et un chercheur en sciences du bois. À la faveur de ce partage de compétences pédagogiques et de connaissances scientifiques, ils se sont tous mis au service de l'(auto)apprentissage de l'élève et de son développement autour des quatre dimensions de l'activité scientifique (Carosin et Demeuse, 2018), qui sont la créativité, l'esprit critique, la méthodologie et la coopération. En se conformant à une séquence scientifique usuelle (observations, questionnements, bibliographies, élaboration des protocoles de recherche, recherche proprement dite, analyses et interprétations, conclusion et restitution), compatible avec les activités d'apprentissage en classe (CRI Paris, 2019), enseignants et élèves se sont intéressés à la croissance des arbres. Les élèves ont ainsi compris et expérimenté une double démarche de recherche (production, validation et transfert de connaissances) et d'ingénierie (identification du problème et mise en place des moyens pour le résoudre). Ce questionnement scientifique est la base de la pédagogie active. Il traduit une motivation, moteur du savoir et de l'apprentissage de l'élève (Giordan et De Vecchi, 1988).

Interventions de la communauté scientifique dans le projet

La guide nature et patrimoine

La nature représente un formidable terrain d'expériences et de pédagogie en parfaite adéquation avec la démarche scientifique établie en classe. C'est pourquoi, dès le début de leur projet, les élèves avec les enseignants ont organisé une journée dans la forêt d'Halatte (Parc naturel régional Oise-Pays de France), en automne, avec une guide nature du Parc naturel régional (photo 2). Lors de cette sortie en forêt, les élèves ont mobilisé leurs sens afin d'appréhender leur environnement. Dans la forêt, élèves et enseignants ont utilisé leur capacité sensorielle en voyant des couleurs et des formes variées, en écoutant les sons de la forêt et des animaux, en sentant le parfum des arbres, du sol forestier et de l'humus, puis finalement en touchant les différentes textures d'écorces d'arbres et de sols.

Les élèves ont ainsi circulé et observé, à leur rythme, deux parcelles forestières différentes : une plantation de pins sylvestres (*Pinus sylvestris*) [résineux] (figure 1b) et des peuplements de chênes (*Quercus petraea*, *Quercus robur* L.) issus de taillis sous futaie [feuillus]. Ils ont également pénétré dans des peuplements issus de taillis sous futaie constitués majoritairement de tilleuls (*Tilia x europaea* L.) et de charmes (*Carpinus betulus*), et dans une futaie de hêtres (*Fagus sylvatica*). À la faveur de ces différents types de plantations et de gestion forestière, les élèves ont découvert que l'être humain joue un rôle important dans la gestion et la protection des forêts. En observant les différentes parties des arbres présents autour d'eux (racines, troncs, écorces, branches, feuilles, résines), les élèves ont appris à différencier les feuillus des résineux, et ont été initiés aux différents moyens qui permettent d'identifier l'essence d'un arbre.

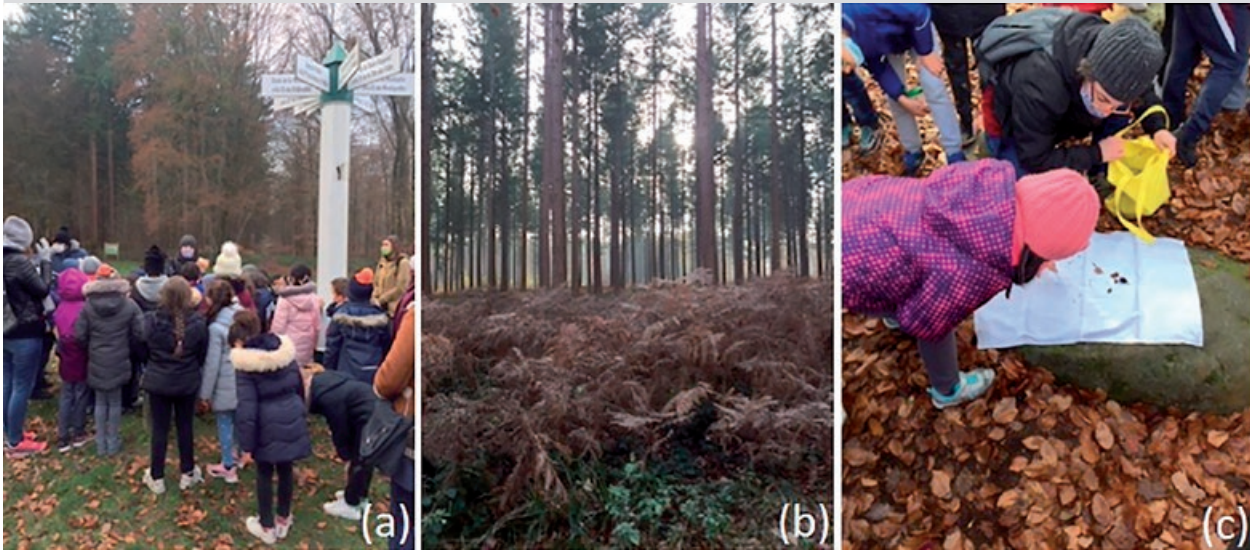


Photo 2.

Visite et découverte multisensorielle de la classe en forêt d'Halatte (Oise, France), accompagnée d'une guide nature.
 (a) Orientation dans la forêt aménagée d'Halatte. (b) Observation d'une plantation de résineux, pin sylvestre (*Pinus sylvestris*), (c) Prélèvements et observations d'insectes et d'invertébrés.
 Multi-sensorial visit and discovery of the class in the Halatte forest (Oise, France), accompanied by a nature guide.
 (a) Orientation in the Halatte forest, (b) Observation of a Scots pine (*Pinus sylvestris*) plantation, (c) Sampling and observation of insects and invertebrates.
 Photo P. Mouelle.

Tableau I.

Listes des différents éléments et être vivants observés et étudiés (en fonction des capacités sensorielles mobilisées) par les élèves au cours de la journée en forêt d'Halatte.
 Lists of the different elements and living beings observed and studied (according to the sensory capacities mobilised) by the pupils during the day in the Halatte forest.

Les êtres vivants présents en forêt	Capacités sensorielles mobilisées	Activités pédagogiques, résultats et remarques
Les arbres	La vue L'odorat Le toucher L'ouïe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Immersion et bien-être ressenti en forêt et identification des sons. ▪ Comparaison de deux parcelles forestières, composées de feuillus ou de résineux : hêtres (<i>Fagus sylvatica</i>), chênes (<i>Quercus petraea</i>, <i>Quercus robur</i> L.), tilleuls (<i>Tilia × europaea</i> L.), charmes (<i>Carpinus betulus</i>) pour les feuillus ; pin sylvestre (<i>Pinus sylvestris</i>) pour les résineux. ▪ Comparaison des différentes parties d'un arbre et initiation à l'identification des quelques essences d'arbres citées auparavant. ▪ Recensement des couleurs observées dans la nature. ▪ Observations de champignons sur les arbres et sur le sol. ▪ Perceptions des odeurs agréables / désagréables : les enfants ont senti l'odeur des arbres, de la terre et de la mousse.
Les crapauds	La vue	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Observations de crapauds communs (<i>Bufo bufo</i> L.). Présentation du cycle du crapaud à l'aide de figurines en plastique.
Les invertébrés	La vue	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Observations d'insectes (<i>Carabus nemoralis</i>, <i>Vespa velutina</i>, <i>Nemobius sylvestris</i>), de myriapodes (Julida Leach, 1874), de mollusques (<i>Stylommatophora</i> Schmidt, 1856, <i>Lehmannia marginata</i>), d'araignides (<i>Opiliones</i> Sundevall, 1833) et d'annélides (<i>Lumbricina</i> De Blainville, 1830).
La galle du chêne	La vue	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Explication de cette symbiose entre la plante et l'insecte (<i>Cynips quercusfolii</i>).

**Photo 3.**

Journée passée avec le mentor scientifique du Cirad. (a) Détermination de l'âge des arbres en comptant le nombre de cernes de croissance sur des rondelles échantillonnées sur différentes essences d'arbres. (b) Moment d'échange autour des insectes (termites, *Reticulitermes flavipes*) et des champignons (*Coniophora puteana*, *Trametes versicolor*) qui peuvent s'attaquer au bois. Day spent with CIRAD scientific mentor. (a) Determination of tree age by counting the number of growth rings on logs sampled from different tree species. (b) Discussion on insects (termites, *Reticulitermes flavipes*) and fungi (*Coniophora puteana*, *Trametes versicolor*) that can attack wood.

Photos P. Mouelle.

Au-delà de cette découverte multisensorielle, cette journée a permis à la guide nature de présenter aux élèves différents êtres vivants que l'on peut rencontrer en milieu forestier, en précisant que chacun d'eux joue un rôle dans la biodiversité et la prospérité de ces forêts (tableau I).

Le chercheur en sciences du bois

Tout au long du projet, les élèves et les enseignants ont communiqué de façon régulière avec leur mentor scientifique (appel vidéo, messagerie instantanée et mail). Dans un premier temps, le mentor a présenté le monde scientifique, en précisant à la classe son domaine de recherche et ses activités de chercheur. Puis il a suivi le projet, du début à la fin, en conseillant les élèves et les enseignants intervenant dans leur questionnement et leur démarche scientifique. Un parallèle a alors été établi entre la classe et le laboratoire. Le mentor a également rendu visite à la classe durant une journée (photo 3).

Mise en place d'essais de plantation de noyers

L'éducation par la recherche s'appuie sur les pratiques de laboratoire pour didactiser des objets et des procédures susceptibles de renforcer les apprentissages scientifiques des élèves ainsi que les compétences langagières à l'oral comme à

l'écrit. Il n'y a pas d'éducation à l'environnement sans action : les connaissances acquises doivent être immédiatement réactivées dans l'action pour être intégrées le mieux possible par les jeunes élèves. Les essais de plantation de très jeunes noyers (*Juglans regia* L.) en salle de classe ont constitué une étape de mise en pratique, indispensable au projet, afin que les élèves puissent comprendre comment l'arbre grandit et pourquoi il est utile à l'environnement et au monde vivant.

En menant leur propre expérience de plantation, en classe, les élèves ont dû mettre en place un protocole de recherche leur permettant de mettre en évidence les éléments essentiels à la photosynthèse et à la croissance des arbres. Ils ont ainsi appris que l'arbre a besoin de nutriments fournis par la terre, d'eau, de lumière et de CO₂ « transformés » en sève par la photosynthèse qu'active la chlorophylle présente dans les feuilles.

Les élèves se sont organisés collectivement pour établir un protocole d'essai (protocole d'essai et mesures en figure 2) leur permettant de collaborer en se partageant les différentes tâches de l'expérimentation : observation de la germination des noix, repiquage en pots, arrosage régulier, mesure de la taille des arbres et comptage des feuilles périodiquement réalisé par plusieurs élèves afin de s'assurer de la répétabilité et la reproductibilité.

Résultats

Observations et questionnements induits

Deux élèves ont observé qu'un liquide jaune coulait sur le tronc d'un arbre dans la cour de récréation, à la fin du mois de septembre. En se demandant ce que cette substance pouvait être et si celle-ci avait été produite par l'arbre, la classe a décidé de s'interroger et de mener un projet de recherche sur cette substance (photo 4). Les élèves ont fait émerger les questions suivantes : Quelle est cette substance collante ? À quoi sert-elle ? Est-ce de la sève ou de la résine ?

Produit de la recherche documentaire

Élèves et enseignants ont débattu en classe, et les premiers mots sortant de la bouche des élèves ont été « colle », « miel » et « sève », posant ainsi leurs premières hypothèses. Leur travail collaboratif a guidé leurs investigations bibliographiques afin d'évaluer ces hypothèses. Durant cette phase, les élèves ont appris les astuces pour mener une recherche d'informations, en recourant à divers supports tels que la bibliothèque de l'école, des livres, Internet, ainsi que des documents audiovisuels. Après avoir collectivement identifié quelques mots-clés comme arbre, croissance, colle et sève, les élèves ont mené leur recherche bibliographique, aidés de la guide nature et du mentor scientifique. En récoltant les informations, les élèves sont devenus critiques vis-à-vis de la fiabilité des sources consultées et de la véracité des informations obtenues.

Par leur recherche bibliographique, notamment la lecture de l'ouvrage *Les arbres* (Hédelin et Laprun, 2014), les élèves ont repéré le mot sève. Ils y ont lu que la sève est un peu comme le sang dans notre corps, qu'elle circule dans tout l'arbre, le nourrit, et constitue un élément essentiel à sa croissance.

Questions scientifiques induites

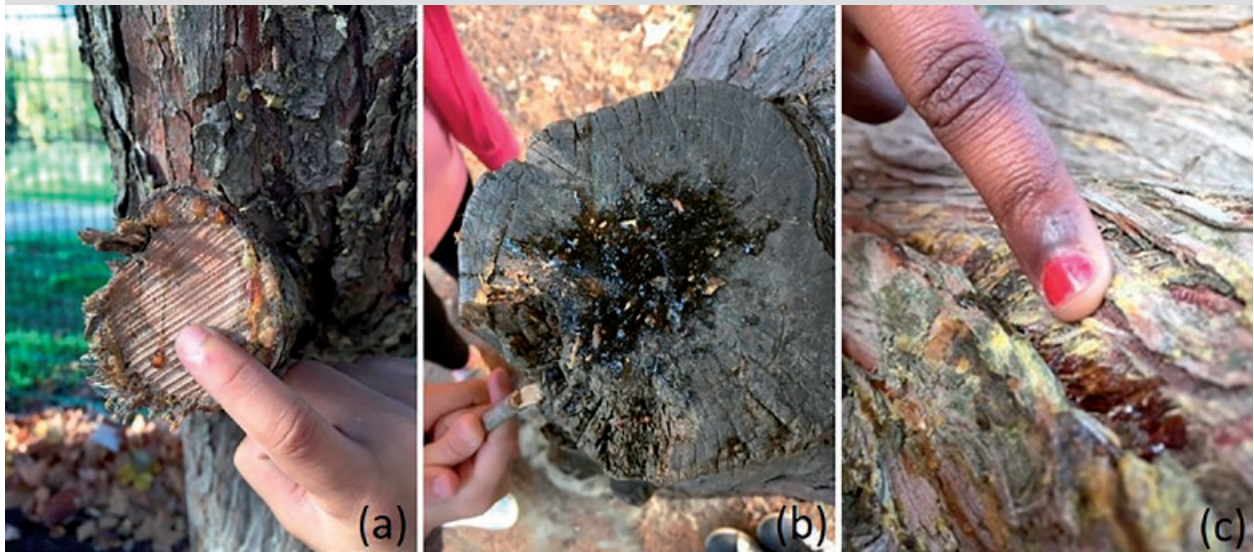
Même si, pendant leur journée en forêt, les élèves se sont consacrés à l'observation des arbres, des insectes, des animaux et à l'environnement qui les entouraient, et bien qu'ils n'aient pas eu l'occasion d'observer de substances collantes sur les arbres ce jour-là, ils ont profité de la présence de la guide nature pour lui demander comment s'appelle le liquide jaune que l'on peut trouver sur les pins sylvestres, comme dans leur cour d'école. La guide a affirmé que c'était de la résine. Cette réponse venant contredire leurs premières hypothèses émises sur le fait que la substance qui coulait sur le tronc de l'arbre dans leur cour d'école était de la sève, les élèves se sont aperçus que les réponses trouvées par leurs recherches bibliographiques n'étaient pas forcément les bonnes. Par la suite, ils se sont donc intéressés aux différences qu'il peut y avoir entre la sève et la résine. De cette comparaison, les élèves ont tenté de formuler les questions scientifiques pour répondre à leur quête de connaître et de savoir.



Figure 2.

Informations retranscrites dans le cahier d'expérimentation des élèves (photo, taille des arbres, nombre de feuilles) tout au long des essais de plantation de noyers. (a) Les élèves ont observé que le plant débute sa croissance par une simple tige avec des premières feuilles différentes de celles qui suivront. (b) le noyer mesure 32 cm et a 8 feuilles. (c, d, e) Les élèves ont aussi mis en évidence que certaines feuilles étaient même très grandes par rapport à la tige de l'arbre. *Information recorded in the pupil's experiment notebook (photo, tree sizes, number of leaves) throughout the walnut tree planting trials. (a) The pupils observed that the plant starts its growth with a simple stem with first leaves different from those that will follow. (b) the walnut tree is 32 cm in height and has 8 leaves. (c, d, e) The pupils also showed that some leaves were even very large in relation to the tree stem.*
 Photos P. Mouelle.

Les noix ont été repiquées par les élèves le 2 novembre 2020. La germination de celles-ci a été observée le 22 décembre 2020. À partir de cette étape, les élèves ont régulièrement relevé la hauteur des plants à l'aide d'un mètre linéaire et ont compté visuellement le nombre de feuilles présentes sur chaque arbre. À chaque fois, ces mesures ont été réalisées à plusieurs reprises et par différents élèves.

**Photos 4.**

Découverte, par les élèves, de la sève d'un pin sylvestre dans la cour de récréation. (a) Liquide jaune s'écoulant d'une branche coupée. (b) Tentative de prélèvement d'un échantillon du liquide sur la branche. (c) Observation du liquide sur l'écorce.

The pupils discovered the sap of a Scots pine in the playground. (a) Yellow liquid flowing from a cut branch.

(b) Attempt to take a sample of the liquid from the branch. (c) Observation of the liquid on the bark.

Photos P. Mouelle.

À partir de ce constat et avec l'appui du mentor scientifique, élèves et enseignants ont explicité les questionnements scientifiques de leur projet : Comment poussent les arbres ? De quoi sont composées la sève et la résine, et en quoi sont-elles différentes ? À quoi sont-elles utiles pour l'arbre et pour l'être humain ?

Le rôle du mentor a été de leur apporter des éléments scientifiques concernant la croissance des arbres, en mettant l'accent sur les rôles de la sève et de la résine dans le développement de ces derniers. En fonction des explications fournies par le mentor, et des échanges qui ont suivi, les élèves ont conclu que la substance observée sur le pin sylvestre était de la résine.

Pour les inviter à aller plus loin dans leur recherche, le mentor a interrogé les élèves sur l'utilisation des sèves et des résines par les humains. Grâce à ce débat entre élèves, enseignants et chercheur, et aux lectures ou au visionnage de documentaires audiovisuels, les élèves ont découvert que ces substances produites par les arbres sont parfois récoltées, transformées, traitées et utilisées par l'homme de façons très diverses (Arbre & Paysage 32, 2013).

Organisation et analyse des résultats obtenus par les expérimentations de plantation

À la faveur de l'expérimentation que la classe a menée, les élèves ont pu, tout au long de l'année scolaire, observer les noyers pousser grâce à la terre, la lumière, l'eau et l'air. Ils ont ainsi observé et retracé, par des mesures et des photographies, l'évolution de la croissance de leurs arbres (figure 2). Même si ce projet d'une année n'a pas permis aux élèves de réellement observer la croissance de l'arbre et la formation du bois, nécessitant plus de temps, ils ont tout

de même pu étudier le développement de la plante dans les premiers temps de sa croissance.

Au début, ils ont observé le développement racinaire des arbres. Ensuite, ils ont découvert que l'arbre ne sort pas de terre directement en tant que tel, mais qu'il passe par une étape de germination. Les élèves ont ainsi constaté que le plant débute sa croissance par une tige avec de toutes petites feuilles. Ces toutes premières feuilles s'épuisent et constituent les prochaines feuilles de l'arbre. Il a donc fallu attendre plusieurs semaines pour voir apparaître de grandes feuilles similaires à celles que les élèves avaient relevées dans leur recherche bibliographique. Au commencement, elles sont minuscules et enroulées sur elles-mêmes, au niveau du bourgeon. Avec le temps, ce dernier s'ouvre, se déploie et la feuille grandit. Les observations quotidiennes ont conduit les élèves à découvrir que le bourgeon donne naissance à la feuille puis à la branche. Ils ont aussi mis en évidence que certaines feuilles étaient même très grandes par rapport à la tige de l'arbre (figure 2).

Dans la continuité de la démarche scientifique, élèves, enseignants et mentor scientifique ont réfléchi à un moyen simple et visuel qui leur permettrait d'illustrer les résultats de leurs expériences. Les élèves ont transposé le développement en hauteur des arbres avec leur propre croissance. Avec l'aide des enseignants et du mentor, ils ont trouvé leur propre courbe de croissance dans leurs carnets de santé, puis l'ont analysée. Les élèves et les enseignants ont ainsi décidé d'illustrer les résultats de leur expérience avec la même méthode. La figure 3 présente le développement des jeunes plants de noyer, observés par les élèves au cours de leurs expérimentations, en fonction de la croissance en hauteur et de l'augmentation de leur nombre de feuilles, au cours du temps.

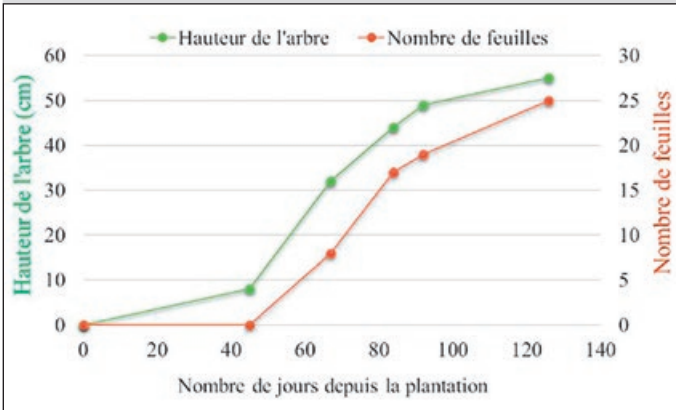


Figure 3.

Évolution de la hauteur et du nombre de feuilles des noyers, en fonction du temps. Le noyer commence sa croissance, après 45 jours, par un cotylédon. C'est après 60 jours que les premières feuilles ont été observées, celles-ci étant très grandes en comparaison de l'épaisseur de la tige de la plante. *Evolution of the height and number of leaves of walnut trees, as a function of time. The walnut tree starts its growth after 45 days, with a cotyledon. After 60 days the first leaves were observed, which were very large compared to the thickness of the plant stem.*

À la faveur de ces projets, les élèves ont donc acquis les premières compétences nécessaires pour : rendre compte des observations, expériences, hypothèses et conclusions en utilisant un vocabulaire précis ; utiliser différents modes de représentations formalisées sous forme de schéma, dessin, croquis, tableau, graphique ou texte ; et finalement expliquer un phénomène à l'oral et à l'écrit. L'ensemble de cette phase a donc permis aux élèves de rendre visible le travail de la classe, de garder des traces de toutes les étapes du projet, de travailler les compétences linguistiques, de communiquer avec d'autres classes, des chercheurs et des experts, et enfin de faire le lien entre la science et la société représentée par les parents et les autres écoles.

Conclusion

La finalité de ce projet a été de rendre les élèves suffisamment confiants pour qu'ils aient le plaisir et la fierté de s'exprimer, de les aider à prendre une posture de chercheur qui leur sera utile dans tous les apprentissages, et de développer leur esprit critique, tout en leur apportant le langage scientifique nécessaire à la compréhension et à la résolution de problèmes quel que soit le domaine rencontré.

Au cours de chacune des étapes de ce projet, les élèves ont acquis de nombreuses connaissances scientifiques sur les arbres mais ils ont surtout développé leurs compétences suivant les quatre dimensions de l'activité scientifique : dimension créative, dimension critique, dimension collaborative et dimension méthodologique.

D'une autoévaluation réalisée auprès des élèves, il est clairement ressorti que le contact avec la nature, les arbres et les insectes, la mise en éveil de leurs capacités sensorielles et la pratique d'expériences scientifiques ont construit la base

de leur motivation et leur implication dans ce projet et, par conséquent, de leur (auto)apprentissage. Le ressenti des élèves, vis-à-vis de ce projet scientifique sur les arbres, met en évidence que la pédagogie active et l'expérimentation par la pratique, en classe ou sur le terrain, sont des éléments essentiels au développement de la curiosité, de la rigueur, de l'esprit créatif et critique des jeunes élèves, ce qui leur permet de répondre aux nombreuses questions que le monde alentour leur suggère. Certains élèves ont même reproduit chez eux les expériences de plantation faites en classe et continuent de suivre de près l'évolution de la croissance de leurs arbres.

L'intérêt porté au projet, la motivation et la rigueur dont ont fait preuve les élèves, ainsi que la spontanéité et la pertinence de leurs réflexions, cela même chez les plus jeunes, ont été surprenants et confortent le fait qu'une telle innovation pédagogique est un atout considérable à ce stade de leur formation. Enfin, les élèves ont su relier les connaissances acquises au cours de ce projet de recherche à des questions environnementales d'actualité (captation du CO₂ dans l'arbre et la forêt, rôles des arbres et de la forêt pour la biodiversité, pour les humains, les êtres vivants et l'environnement). Les élèves ont fait preuve d'une grande ouverture d'esprit, en se mettant dans la peau d'un vrai scientifique, et en développant des compétences solides liées à la valorisation et la communication de leurs résultats de recherche.

Remerciements

Les auteurs remercient le Centre de recherches interdisciplinaires de Paris et les « Savanturiers – École de la Recherche » pour leur appui dans ces programmes de mobilisation et de fédération entre les communautés éducatives et scientifiques au service de l'École ; la ville de Creil et la ligue des Savanturiers creillois, pour leur soutien et leurs activités de coordination au niveau régional ; l'alliance Agreenium et le Cirad, pour leur participation et l'apport scientifique à la dynamique des « Savanturiers » dans la compréhension des agrobiosciences ; le Parc naturel régional Oise-Pays de France pour l'organisation des journées en forêt ; enfin, l'ensemble des élèves, des enseignants et des membres des différentes équipes pédagogiques, l'équipe de l'école élémentaire Albert Camus et son directeur Xavier Bulliard, la formatrice Maths-Sciences, Sandrine Métarfi, tous ayant œuvré au bon déroulement de ce projet « Savanturiers – École de la Recherche ».

Références

- Arbre & Paysage 32, 2013. L'arbre champêtre, première matière. 13 p. <https://www.agroforesterie.fr/documents/fiches-thematiques/livret-Arbre-matiere-premiere-AP32-Arbre-et-Paysage-agroforesterie.pdf>
- Bisault J., 2010. Des moments de sciences à l'école primaire : quelles références pour quels enjeux ? Recherches en Didactiques des Sciences et Technologies, 2 : 53-78. Mis en ligne le 15 mars 2013. <https://doi.org/10.4000/rdst.284>
- Carosin E., Demeuse M., 2018. Les Savanturiers, l'école de la recherche. Rapport d'évaluation final pour des apprentissages savants et aventureux. Faculté de psychologie et des sciences de l'éducation, Institut d'administration scolaire, Université de Mons, Belgique. https://les-savanturiers.cri-paris.org/wp-content/uploads/2019/01/recherche_rapport-inas-mons-vf.pdf
- CRI Paris, 2019. Accompagnez une classe dans un projet de recherche ou d'ingénierie. Centre de recherches interdisciplinaires, 2 p. https://les-savanturiers.cri-paris.org/wp-content/uploads/2019/07/aam1920_flyer-vffweb.pdf
- CRI Paris, 2020. Explorer, partager, s'engager pour l'éducation. Centre de recherches interdisciplinaires, 2 p. https://les-savanturiers.cri-paris.org/wp-content/uploads/2020/04/sav_brochure202004-vfweb.pdf
- Giordan A., De Vecchi G., 1988. Les Origines du savoir : des conceptions des apprenants aux concepts scientifiques (compte-rendu). Revue Française de Pédagogie, 84 : 95-97.
- Hédelin P., Laprun A., 2014. Les arbres. Toulouse, France, Éditions Milan, 40 p.
- Lafosse-Marin M. O., 2004. L'accompagnement scientifique en primaire à travers les interactions langagières. ASTER, 38 : 41-67.
- Lafosse-Marin M. O., 2010. Les représentations des scientifiques chez les enfants, filles et garçons. Influence de la pratique des sciences à l'école primaire. Thèse de doctorat, Université Paris Ouest Nanterre La Défense, France, 353 p.
- Ligue des Savanturiers creillois, 2020. Un projet pour la cité éducative des hauts de Creil : la ligue des Savanturiers creillois. 11 p. <https://ur-biowoob.cirad.fr/content/download/5684/43176/version/1/file/20210114+partenariat+savanturiers+et+cit%C3%A9+du+educative+creil.pdf>
- Rahm J., 2006. L'accès des jeunes provenant de milieux défavorisés aux activités scientifiques extrascolaires : une question d'équité. Revue des Sciences de l'Éducation, 32 (3) : 733-758.
- Savanturiers, 2020. Les classes participantes depuis 2015 – Cartographie. Centre de recherches interdisciplinaires. <https://les-savanturiers.cri-paris.org/a-propos/notre-communaute/cartographies/>
- Savanturiers, 2021. Carte de navigation, se repérer dans un projet de recherche. Centre de recherches interdisciplinaires. <https://les-savanturiers.cri-paris.org/outil/carte-de-navigation/>

Candelier *et al.* – Contribution des auteurs

Rôle du contributeur	Noms des auteurs
Conceptualisation	K. Candelier, P. Mouelle, M. Batteux
Gestion des données	K. Candelier, P. Mouelle, M. Batteux
Analyse formelle	K. Candelier, P. Mouelle, M. Batteux
Acquisition du financement	P. Mouelle, M. Batteux, É. Manzanares, P. Clair, A. Ansour
Enquête et investigation	P. Mouelle, M. Batteux
Méthodologie	K. Candelier, P. Mouelle, M. Batteux, P. Clair, A. Ansour
Gestion de projet	P. Mouelle, M. Batteux, P. Clair, É. Manzanares
Ressources	K. Candelier, P. Mouelle, A. Ocana, M. Batteux, E. Manzanares, P. Clair, A. Ansour
Supervision	P. Mouelle, M. Batteux, P. Clair, É. Manzanares
Validation	K. Candelier, P. Mouelle, M. Batteux
Visualisation	K. Candelier
Écriture – Préparation de l'ébauche originale	K. Candelier, P. Mouelle
Écriture – Révision et édition	K. Candelier, P. Mouelle, A. Ocana, P. Clair, A. Ansour

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

Idéwa

Extrait de l'Atlas des bois tropicaux – Caractéristiques technologiques et utilisations. J. Gérard (coord.), D. Guibal (au.), J.-C. Cerre (au.), S. Paradis (au.), et 40 auteurs, 2016. Éditions Quæ, 1000 p.

<https://www.quae.com/produit/1408/9782759225521/atlas-des-bois-tropicaux>

Accès à la notice d'information générale :

<https://doi.org/10.19182/bft2021.347.a36353>

Famille. Leguminosae (Fabaceae).

Noms botaniques. *Haplormosia monophylla* Harms

Continent. Afrique.

CITES (Convention de Washington, 2016). Pas de restriction commerciale.

Description de la grume

Diamètre. De 60 à 80 cm.

Épaisseur de l'aubier. De 1 à 2 cm.

Flottabilité. Non flottable.

Conservation en forêt. Bonne.

Description du bois

Couleur référence. Brun.

Aubier. Bien distinct.

Grain. Moyen.

Fil. Droit et contrefil.

Contrefil. Léger.

Notes. Aubier blanc jaunâtre. Duramen jaunâtre à brun chocolat. Maillure fine.

Propriétés physiques et mécaniques

Propriété	Valeur moyenne
Densité ⁽¹⁾	0,87
Dureté Monnin ⁽¹⁾	8,0
Coefficient de retrait volumique	0,63 % par %
Retrait tangentiel total (Rt)	7,0 %
Retrait radial total (Rr)	2,9 %
Ratio Rt/Rr	2,4
Point de saturation des fibres	21 %
Conductivité thermique (λ)	0,28 W/(m·K)
Pouvoir calorifique inférieur	-
Contrainte de rupture en compression ⁽¹⁾	70 MPa
Contrainte de rupture en flexion statique ⁽¹⁾	133 MPa
Module d'élasticité longitudinal ⁽¹⁾	16 910 MPa

⁽¹⁾ À 12 % d'humidité, avec 1 MPa = 1 N/mm².

Durabilité naturelle et imprégnabilité du bois

Résistance aux champignons. Classe 1 – très durable.

Résistance aux insectes de bois sec. Classe D – durable (aubier distinct, risque limité à l'aubier).

Résistance aux termites. Classe D – durable.

Imprégnabilité. Classe 4 – non imprégnable.

Classe d'emploi couverte par la durabilité naturelle. Classe 4 – en contact avec le sol ou l'eau douce.

Notes. En raison de sa dureté élevée, cette essence couvre naturellement la classe d'emploi 5 (utilisation en milieu marin ou eau saumâtre). Cependant, cette caractéristique est sans intérêt pour cette essence semi-précieuse.



Dosse.
Photo D. Guibal, Cirad.



Quartier.
Photo D. Guibal, Cirad.

Traitement de préservation

Contre les attaques d'insectes de bois sec. Ce bois ne nécessite pas de traitement de préservation.

En cas d'humidification temporaire. Ce bois ne nécessite pas de traitement de préservation.

En cas d'humidification permanente. Ce bois ne nécessite pas de traitement de préservation.

Séchage

Vitesse de séchage. Lente.

Risque de déformation. Élevé.

Risque de cémentation. Pas de risque particulier connu.

Risque de fentes. Élevé.

Risque de collage. Pas de risque particulier connu.

Programme de séchage proposé. Programme n° 6 (voir note explicative).

Sciage et usinage

Effet désaffûtant. Assez important.

Denture pour le sciage. Denture stellitée.

Outils d'usinage. Au carbure de tungstène.

Aptitude au déroulage. Non recommandé ou sans intérêt.

Aptitude au tranchage. Bonne.

Notes. Difficultés à l'usinage du bois dues au contrefil.

Assemblage

Clouage-vissage. Bonne tenue, avant-trous nécessaires.

Notes. Bois dense : la mise en œuvre du collage doit particulièrement respecter les règles de l'art et les préconisations indiquées pour la colle utilisée.

Classements commerciaux

Classement d'aspect des produits sciés

Selon les règles de classement SATA (1996).

Pour le « Marché général »

Classements possibles avivés : choix i, choix ii, choix iii, choix iv.

Classements possibles coursons : choix i, choix ii.

Classements possibles coursons de chevrons : choix i, choix ii, choix iii.

Pour les « Marchés particuliers »

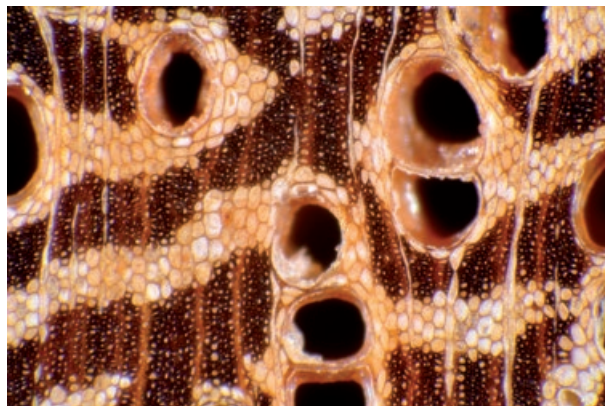
Classements possibles frises et planchettes : choix i, choix ii, choix iii.

Classements possibles chevrons : choix i, choix ii.

Sections transversales de *Haplormosia monophylla*.
 Photo J.-C. Cerre.



2 mm



0,5 mm

Réaction au feu

Classement conventionnel français

Épaisseur > 14 mm : M3 (moyennement inflammable).

Épaisseur < 14 mm : M4 (facilement inflammable).

Classement selon euroclasses. D-s2, d0.

Ce classement par défaut concerne les bois massifs répondant aux exigences de la norme NF EN 14081-1 (avril 2016) : bois de structure utilisés en parois verticales et plafonds, classés, de densité moyenne minimale 0,35 et d'épaisseur minimale 22 mm.

Principales utilisations

Articles tournés.

Construction navale (bordé et pont).

Ébénisterie (meuble de luxe).

Escalier d'intérieur.

Face ou contreface de contreplaqué.

Lambris.

Manche d'outil (bois résilient).

Menuiserie extérieure.

Menuiserie intérieure.

Parquet.

Placage tranché.

Sculpture.

Tabletterie.

Notes. Succédané de l'Afromosia et du Palissandre.

Principales appellations vernaculaires

Pays	Appellation
Côte d'Ivoire	Dinankrohia, Larme
Gabon	Idéwa
Liberia	Black gum
Nigeria	Akoti

Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2021.349.a36794>

Droit d'auteur © 2021, Bois et Forêts des Tropiques © Cirad © Quæ

Date de publication : 1^{er} septembre 2021



Restaurant en bordure de la lagune
Fernan Vaz, Omboué (Gabon).
Photo E. Groutel, WALE.

Idéwa

From Tropical timber atlas – Technological characteristics and uses.

J. Gérard (coord.), D. Guibal (au.), J.-C. Cerre (au.), S. Paradis (au.), et 40 auteurs, 2016.
Publisher Éditions Quæ, 1000 p.

<https://www.quae.com/produit/1477/9782759227716/tropical-timber-atlas>

Access to the general information leaflet:

<https://doi.org/10.19182/bft2021.347.a36353>

Family. Leguminosae (Fabaceae).

Botanical names. *Haplormosia monophylla* Harms.

Continent. Africa.

CITES (Washington Convention of 2017). No trade restrictions.

Log description

Diameter. 60 to 80 cm.

Thickness of sapwood. 1 to 2 cm.

Buoyancy. Does not float.

Log conservation. Good.

Wood description

Reference colour. Brown.

Sapwood. Clearly demarcated.

Texture. Medium.

Grain. Straight or interlocked.

Interlocked grain. Slight.

Notes. Light yellow sapwood. Heartwood yellowish brown to chocolate brown.

Thin silver figure.

Physical and mechanical properties

Property

Density(1)
Monnin hardness(1)
Coefficient of volumetric shrinkage
Total tangential shrinkage (Ts):
Total radial shrinkage (Rs):
T/R anisotropy ratio
Fibre saturation point
Thermal conductivity (λ)
Lower heating value
Crushing strength(1)
Static bending strength(1)
Longitudinal modulus of elasticity(1)

Mean value

0.87
8.0
0.63 % per %
7.0 %
2.9 %
2.4
21 %
0.28 W/(m·K)
-
70 MPa
133 MPa
16,910 MPa

(1) at 12% moisture content, with 1 MPa = 1 N/mm².

Natural durability and treatability

Resistance to decay. Class 1 – very durable.

Resistance to dry wood borers. Class D – durable (sapwood demarcated, risk limited to sapwood).

Resistance to termites. Class D – durable.

Treatability. Class 4 – non-treatable.

Use class covered by natural durability. Class 4 – in ground or fresh water contact.

Notes. This species naturally covers the use class 5 (end uses submerged in salt water, sea water or brackish water) due to its pronounced hardness. However this characteristic is of little interest for this semi-precious species.



Flat sawn.
Photo D. Guibal, Cirad.



Quarter sawn.
Photo D. Guibal, Cirad.

Preservation treatment

Against dry wood borer attacks. This wood does not require any preservation treatment.
In case of temporary humidification. This wood does not require any preservation treatment.

In case of permanent humidification. This wood does not require any preservation treatment.

Drying

Drying rate. Slow.

Risk of distortion. High risk.

Risk of case hardening. No known specific risk.

Risk of checking. High risk.

Risk of collapse. No known specific risk.

Sawing and machining

Blunting effect. Fairly high tooth for sawing. Stellite-tipped.

Machining tools. Tungsten carbide.

Suitability for peeling. Not recommended or without interest.

Suitability for slicing. Good.

Notes. Difficulties in machining due to interlocked grain.

Assembling

Nailing/screwing. Good but pre-boring necessary.

Notes. High specific gravity: important that gluing be performed in compliance with the code of practice and instructions for the glue used.

Commercial grading

Sawn timber appearance grading.

According to SATA grading rules (1996).

For the “General Purpose Market”

Possible grading for square-edged timbers: choice i, choice ii, choice iii, choice iv.

Possible grading for short-length lumbers: choice i, choice ii.

Possible grading for short-length rafters: choice i, choice ii, choice iii.

For the “Special Market”

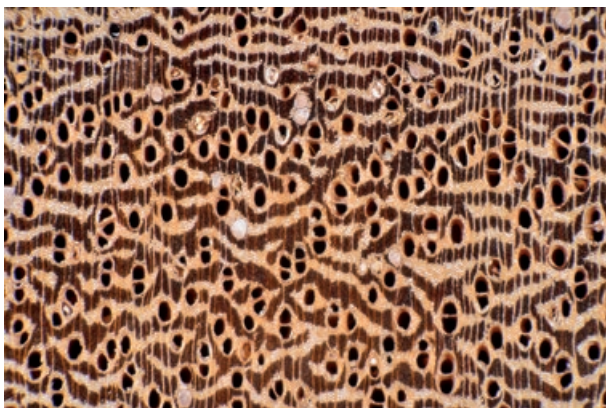
Possible grading for strips and small boards: choice i, choice ii, choice iii.

Possible grading for rafters: choice i, choice ii, choice iii.

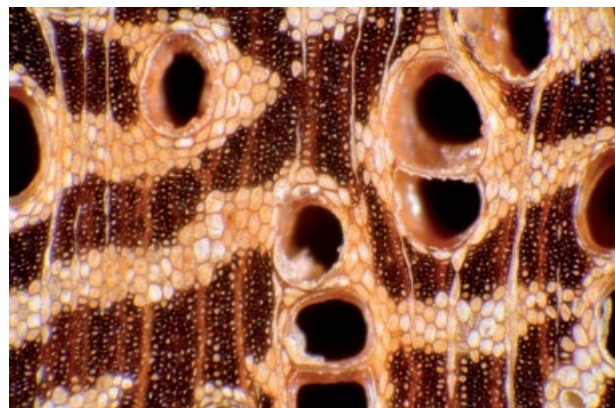
Visual structure grading

According to French standard NF B 52-001-1 (2011), strength class D50 can be provided by visual grading.

Cross sections of *Haplormosia monophylla*.
Photo J.-C. Cerre.



2 mm



0,5 mm

Fire safety**Conventional French grading**

Thickness > 14 mm: M3 (moderately flammable).

Thickness < 14 mm: M4 (readily flammable).

Euroclass grading. D-s2, d0

Default grading for solid wood that meets requirements of European standard NF EN 14081-1 (April 2016): structural graded timber in vertical uses and ceilings with minimal mean density of 0.35 and minimal thickness of 22 mm.

Main end uses

Turned goods.

Ship building (planking and deck).

Cabinetry (high-end furniture).

Stairs (inside).

Veneer for back or face of plywood.

Panelling.

Tool handles (resilient woods).

Exterior joinery.

Interior joinery.

Flooring.

Sliced veneer.

Sculpture.

Marquetry.

Notes. Substitute for Afrormosia and Rosewood.

Common names

Country	Local name
Côte d'Ivoire	Dinankrohia, Larme
Gabon	Idéwa
Liberia	Black gum
Nigeria	Akoti

Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2021.349.a36794>

Droit d'auteur © 2021, Bois et Forêts des Tropiques © Cirad © Quæ

Date de publication : 1^{er} septembre 2021



Restaurant on the edge of Fernan Vaz lagoon, Omboué (Gabon).
Photo E. Groutel, WALE.

Tauari

Extrait de l'Atlas des bois tropicaux – Caractéristiques technologiques et utilisation
 J. Gérard (coord.), D. Guibal (au.), J.-C. Cerre (au.), S. Paradis (au.), et 40 auteurs, 2016.
 Éditions Quæ, 1000 p.

<https://www.quae.com/produit/1408/9782759225521/atlas-des-bois-tropicaux>

Accès à la notice d'information générale :

<https://doi.org/10.19182/bft2021.347.a36353>



Dosse.
 Photo D. Guibal, Cirad.



Quartier.
 Photo D. Guibal, Cirad.

Famille. Lecythidaceae.

Noms botaniques. *Couratari guianensis* Aubl. ; *Couratari macrosperma* A.C. Sm. ; *Couratari multiflora* Eyma (Syn. *Couratari fagifolia*) ; *Couratari oblongifolia* Ducke ; *Couratari* p.p.

Continent. Amérique latine.

CITES (Convention de Washington, 2016). Pas de restriction commerciale.

Notes. Le Tauari regroupe plusieurs espèces du genre *Couratari* dont les propriétés et l'aspect du bois peuvent varier de façon notable.

Description de la grume

Diamètre. De 50 à 80 cm.

Épaisseur de l'aubier. Sans objet.

Flottabilité. Flottable.

Conservation en forêt. Faible (traitement nécessaire).

Description du bois

Couleur référence. Blanc crème.

Aubier. Non distinct.

Grain. Moyen fil. Droit contrefil. Absent.

Notes. Bois blanc crème, blanc rosâtre ou blanc-gris jaunâtre selon les espèces.

Odeur désagréable à l'état vert.

Propriétés physiques et mécaniques

Propriété	Valeur moyenne
Densité ⁽¹⁾	0,62
Dureté Monnin ⁽¹⁾	2,7
Coefficient de retrait volumique	0,50 % par %
Retrait tangentiel total (Rt)	7,0 %
Retrait radial total (Rr)	4,5 %
Ratio Rt/Rr	1,6
Point de saturation des fibres	28 %
Conductivité thermique (λ)	0,21 W/(m·K)
Pouvoir calorifique inférieur	18 780 kJ/kg
Contrainte de rupture en compression ⁽¹⁾	48 MPa
Contrainte de rupture en flexion statique ⁽¹⁾	87 MPa
Module d'élasticité longitudinal ⁽¹⁾	14 500 MPa

(1) À 12 % d'humidité, avec 1 MPa = 1 N/mm².

Durabilité naturelle et imprégnabilité du bois

Résistance aux champignons. Classe 1 – non durable.

Résistance aux insectes de bois sec. Classe S – sensible (risque dans tout le bois).

Résistance aux termites. Classe S – sensible.

Imprégnabilité. Classe 1 – imprégnable.

Classe d'emploi couverte par la durabilité naturelle. Classe 1 – à l'intérieur (pas de risque d'humidification).

Notes. Le Tauari regroupe plusieurs espèces de durabilités naturelles différentes.

Certaines espèces et certaines provenances pourraient être utilisées sans traitement de préservation dans des situations correspondant à la classe d'emploi 2.

Cependant, les lots commerciaux sont le plus souvent constitués d'espèces différentes. De ce fait, les bois les moins durables doivent être pris comme référence.

Traitement de préservation

Contre les attaques d'insectes de bois sec. Ce bois nécessite un traitement de préservation adapté.

En cas d'humidification temporaire. Ce bois nécessite un traitement de préservation adapté.
En cas d'humidification permanente. L'utilisation de ce bois n'est pas conseillée.

Séchage

Vitesse de séchage. Rapide.

Risque de déformation. Absent ou très faible.

Risque de cémentation. Pas de risque particulier connu.

Risque de fentes. Absent ou très faible.

Risque de collapse. Pas de risque particulier connu.

Notes. Le bois doit être séché le plus rapidement possible après abattage pour éviter le bleuissement.

Programme de séchage proposé. Programme n° 4 (voir note explicative).

Sciage et usinage

Effet désaffûtant. Important.

Denture pour le sciage. Denture stellitée.

Outils d'usinage. Au carbure de tungstène.

Aptitude au déroulage. Bonne.

Aptitude au tranchage. Bonne.

Assemblage

Clouage-vissage. Bonne tenue, avant-trous nécessaires.

Classements commerciaux

Classement d'aspect des produits sciés

Selon les règles de classement NHLA (2015).

Classements possibles : FAS, Select, Common 1, Common 2, Common 3.

En Guyane, cette essence est exploitée et commercialisée sous le nom de Maho cigare.

Son classement d'aspect s'effectue selon les règles locales « Bois guyanais classés » (1990).

Classement possible : choix 1, choix 2, choix 3, choix 4.

Réaction au feu

Classement conventionnel français

Épaisseur > 14 mm : M3 (moyennement inflammable).

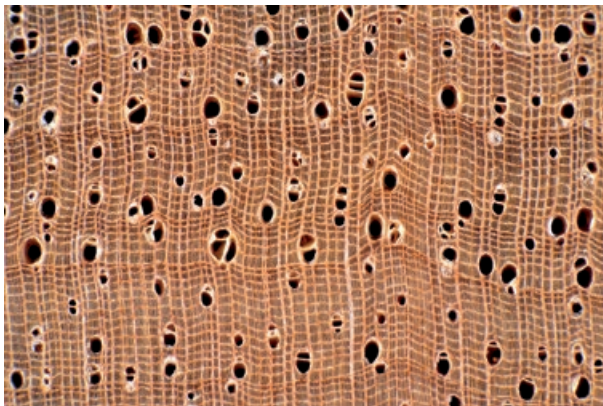
Épaisseur < 14 mm : M4 (facilement inflammable).

Classement selon euroclasses. D-s2, d0.

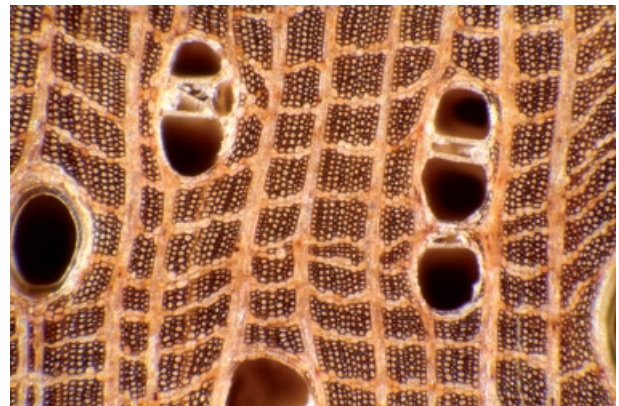
Ce classement par défaut concerne les bois massifs répondant aux exigences de la norme NF EN 14081-1 (avril 2016) : bois de structure utilisés en parois verticales et plafonds, classés, de densité moyenne minimale 0,35 et d'épaisseur minimale 22 mm.

Sections transversales de *Couratari multiflora*.

Photo J.-C. Cerre.



2 mm



0,5 mm

Principales utilisations

Articles tournés.
Charpente.
Coffrage.
Emballage, caisserie.
Escalier d'intérieur.
Face ou contreface de contreplaqué.
Intérieur de contreplaqué.
Lambris.
Lamellé-collé.
Menuiserie extérieure.
Menuiserie intérieure.
Meuble courant ou élément meublant.
Moulure.
Panneau latté.
Parquet.
Placage tranché.
Sièges.

Notes. Succédané de l'Afrormosia et du Palissandre.

Principales appellations vernaculaires

Pays	Appellation
Brésil	Imbirema, Tauari
Guyana	Kakawalli, Wadara
Guyane française	Balata blanc, Couatari, Inguipipa, Maho cigare, Tabari
Suriname	Ingipipa
Venezuela	Capa de tabaco, Tampipio

Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2021.349.a36795>

Droit d'auteur © 2021, Bois et Forêts des Tropiques © Cirad © Quæ

Date de publication : 1^{er} septembre 2021



Porte d'entrée à pointes de diamant, sous abri, Teyran (France).
Photo P. Gérard.

Tauari

From Tropical timber atlas – Technological characteristics and uses.

J. Gérard (coord.), D. Guibal (au.), J.-C. Cerre (au.), S. Paradis (au.), et 40 auteurs, 2016.

Publisher Éditions Quæ, 1000 p.

<https://www.quae.com/produit/1477/9782759227716/tropical-timber-atlas>

Access to the general information leaflet:

<https://doi.org/10.19182/bft2021.347.a36353>

Family. Lecythidaceae.

Botanical names. *Couratari guianensis* Aubl.; *Couratari macrosperma* A.C. Sm.; *Couratari multiflora* Eyma (Syn. *Couratari fagifolia*); *Couratari oblongifolia* Ducke; *Couratari* p.p.

Continent. Latin America.

CITES (Washington Convention of 2017). No trade restrictions.

Notes. The name Tauari covers several species of the genus *Couratari* whose properties and appearance can vary widely.

Log description

Diameter. 60 to 80 cm.

Thickness of sapwood. 1 to 2 cm.

Buoyancy. Does not float.

Log conservation. Good.

Wood description

Reference colour. Brown.

Sapwood. Clearly demarcated.

Texture. Medium.

Grain. Straight or interlocked.

Interlocked grain. Slight.

Notes. Light yellow sapwood. Heartwood yellowish brown to chocolate brown.

Thin silver figure.



Flat sawn.

Photo D. Guibal, Cirad.

Physical and mechanical properties

Property	Mean value
Density(1)	0.62
Monnin hardness(1)	2.7
Coefficient of volumetric shrinkage	0.50 % per %
Total tangential shrinkage (Ts):	7.0 %
Total radial shrinkage (Rs):	4.5 %
T/R anisotropy ratio	1.6
Fibre saturation point	28 %
Thermal conductivity (λ)	0.21 W/(m·K)
Lower heating value	18,780 kJ/kg
Crushing strength(1)	48 MPa
Static bending strength(1)	87 MPa
Longitudinal modulus of elasticity(1)	14,500 MPa

(1) at 12% moisture content, with 1 MPa = 1 N/mm².

Natural durability and treatability

Resistance to decay. Class 5 – non-durable.

Resistance to dry wood borers. Class S – susceptible (risk in all the wood).

Resistance to termites. Class S – susceptible.

Treatability. Class 1 – treatable.

Use class covered by natural durability. Class 1 – inside (no risk of dampness).

Notes. Several species, with different natural durability, are grouped under the name Tauari.

Some species and origins could be used without preservation treatment for end-uses under use class 2. However, commercial lots are usually constituted by different species.

Consequently, it is advisable to use the less durable woods as a point of reference.



Quarter sawn.

Photo D. Guibal, Cirad.

Preservation treatment

Against dry wood borer attacks. This wood requires appropriate preservation treatment.
In case of temporary humidification. This wood requires appropriate preservation treatment.

In case of permanent humidification. Use of this wood is not recommended.

Drying

Drying rate. Rapid.

Risk of distortion. No risk or very slight risk.

Risk of case hardening. No known specific risk.

Risk of checking. No risk or very slight risk.

Risk of collapse. No known specific risk.

Notes. Must be dried as quickly as possible to prevent blue stain.

Suggested drying schedule. Schedule #4 (see explanatory note).

Sawing and machining

Blunting effect. High.

Sawteeth recommended. Stellite-tipped.

Machining tools. Tungsten carbide.

Suitability for peeling. Good.

Suitability for slicing. Good.

Assembling

Nailing/screwing. Good but pre-boring necessary.

Commercial grading

Sawn timber appearance grading.

According to NHLA grading rules (2015).

Possible grading: FAS, Select, Common 1, Common 2, Common 3.

In French Guiana, the local name of this species is Maho cigare. Grading is done according to local rules «Bois guyanais classés» (1990).

Fire safety

Conventional French grading

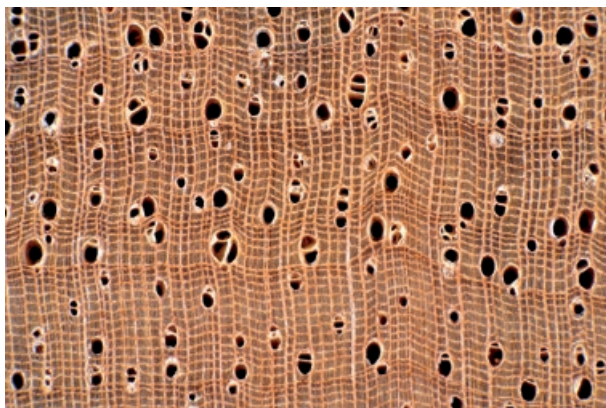
Thickness > 14 mm: M3 (moderately flammable).

Thickness < 14 mm: M4 (readily flammable).

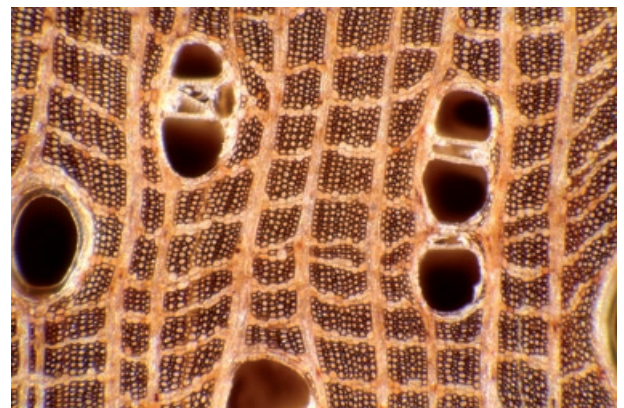
Euroclass grading. D-s2, d0

Default grading for solid wood that meets requirements of European standard NF EN 14081-1 (April 2016): structural graded timber in vertical uses and ceilings with minimal mean density of 0.35 and minimal thickness of 22 mm.

Cross sections of *Couratari multiflora*.
Photo J.-C. Cerre.



2 mm



0,5 mm

Main end uses

Turned goods.
Framing.
Formwork.
Boxes and crates.
Stairs (inside).
Veneer for back or face of plywood.
Veneer for interior of plywood.
Panelling.
Glued Laminated.
Exterior joinery.
Interior joinery.
Built-in furniture or mobile item.
Moulding.
Blockboard.
Flooring.
Sliced veneer.
Seats.

Common names

Country	Local name
Brazil	Imbirema, Tauari
Guyana	Kakawalli, Wadara
French Guiana	Balata blanc, Couatari, Inguipipa, Maho cigare, Tabari
Suriname	Ingipipa
Venezuela	Capa de tabaco, Tampipio

Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2021.349.a36795>

Droit d'auteur © 2021, Bois et Forêts des Tropiques © Cirad © Quæ

Date de publication : 1^{er} septembre 2021



Diamond carved front entrance door (sheltered), Teyran (France).
Photo P. Gérard.

RÉSUMÉ DE THÈSE /
ACADEMIC THESIS ABSTRACT / RESUMEN DE TESIS ACADÉMICA**Planification systématique de la conservation basée sur les contraintes, une approche générique et expressive : application à l'aide à la décision pour la conservation des forêts de Nouvelle-Calédonie**

Dimitri JUSTEAU-ALLAIRE

RÉSUMÉ

Issue de la biologie de la conservation, la planification systématique de la conservation (PSC) est une approche pratique qui se propose de fournir une aide à la décision dans la planification des actions de conservation en intégrant les objectifs écologiques avec les contraintes des gestionnaires. Basée sur la modélisation, l'optimisation et l'informatique, la PSC offre un cadre rationnel pour aborder les problématiques environnementales et réduire le fossé entre recherche et gestion.

Dans cette thèse, nous avons introduit une approche formelle pour modéliser et résoudre des problèmes de PSC basée sur la programmation par contraintes, une méthode issue de l'intelligence artificielle et fondée sur le raisonnement automatique. Notre motivation principale était d'apporter plus d'expressivité à la PSC (i.e. d'accroître l'étendue et la variété des problèmes qui peuvent être représentés et résolus), notamment par l'intégration de contraintes spatiales avancées et d'indices du paysage. Cette approche permet également d'obtenir des garanties sur la qualité des solutions produites (satisfaisabilité, optimalité) qui peuvent améliorer considérablement la qualité de l'aide à la décision.

Nous avons appliqué cette approche sur des données réelles issues des forêts de Nouvelle-Calédonie, un point chaud de la biodiversité qui doit faire face à de nombreux défis pour la conservation de sa biodiversité. Le contexte développé, insulaire et peu peuplé de cet archipel permet une grande proximité entre les différents acteurs de la conservation, ce qui en fait un terrain d'étude approprié pour expérimenter de nouveaux outils pour la conservation. Nous avons illustré cette particularité à travers un cas d'étude mené en étroite collaboration avec les gestionnaires du parc provincial de la « Côte Oubliée – *Woen Vùù – Pwa Preeù* ». Dans cette étude, nous avons fourni une aide à la décision dans un projet de reforestation, en mettant l'accent sur la réduction de la fragmentation et l'amélioration de la connectivité structurelle. Dans l'ensemble, nous avons démontré le caractère générique, la flexibilité et l'expressivité de l'approche basée sur les contraintes appliquée à la PSC. Nos résultats ont également ouvert de nouvelles perspectives pour l'aide à la décision en Nouvelle-Calédonie, la PSC, et la programmation par contraintes.

Mots-clés : planification systématique de la conservation, aide à la décision, conservation des forêts, planification de la restauration écologique, intelligence artificielle, programmation par contraintes, Nouvelle-Calédonie.

Constraint-based systematic conservation planning: a generic and expressive approach applied to decision support for the conservation of New Caledonian forests

ABSTRACT

Originating in conservation biology, systematic conservation biology (SCP) is a practical approach that aims to provide decision support for planning conservation actions by integrating ecological objectives with socio-economic management constraints. Based on modelling, optimization and computer technology, SCP provides an evidence-based framework to address environmental issues and narrow the gap between research and implementation.

In this PhD thesis, we introduced a formal approach to modelling and resolving SCP problems based on constraint programming, a method derived from artificial intelligence and based on automated reasoning. The main reason for adopting this approach was to increase the expressiveness of SCP (i.e. extend the breadth and variety of problems that users can represent and resolve), in particular by integrating advanced spatial constraints and landscape indices. This approach also provides guarantees as to the satisfiability and optimality of the solutions produced. Such guarantees can substantially improve the quality of decision support.

We assessed the methods developed during this thesis against real data from New Caledonian forests. As one of the world's biodiversity hotspots, New Caledonia has to struggle with many conservation challenges. Moreover, the New Caledonian island context, being at once developed and thinly populated, brings conservation stakeholders into close proximity, which makes it an appropriate field of study to experiment with novel approaches. We illustrated this particularity through a real case study, conducted in close collaboration with the managers of the "Côte Oubliée – *Woen Vùù – Pwa Preeù*" provincial park. In this study, we aimed to provide decision support for a reforestation project, with an emphasis on reducing fragmentation and improving structural connectivity. Overall, we demonstrated the generic, flexible and expressive nature of the constraint-based SCP approach. Our results also opened up new perspectives for decision support in New Caledonia, for systematic conservation planning and for constraint programming.

Keywords: systematic conservation planning, decision support, forest conservation, restoration planning, artificial intelligence, constraint programming, New Caledonia.

Planificación sistemática de la conservación basada en restricciones, un enfoque genérico y expresivo: aplicación en la ayuda a la toma de decisiones para la conservación de los bosques en Nueva Caledonia

RESUMEN

La planificación sistemática de la conservación (PCS), que tiene su origen en la biología de la conservación, es un enfoque práctico cuyo objetivo es facilitar la toma de decisiones en la planificación de las acciones de conservación mediante la integración de los objetivos ecológicos con las limitaciones de gestión. Basada en la modelización, la optimización y la informática, la PSC ofrece un marco racional para abordar los problemas medioambientales y salvar la distancia entre la investigación y la gestión.

En esta tesis hemos introducido un enfoque formal para modelar y resolver problemas de PSC según la programación por restricciones, un método de inteligencia artificial basado en el razonamiento automático. Nuestra principal motivación era aportar más expresividad a la PSC (es decir, aumentar el alcance y la variedad de los problemas que pueden representarse y resolverse), especialmente mediante la integración de restricciones espaciales avanzadas e índices del paisaje. Este enfoque también permite obtener garantías sobre la calidad de las soluciones proporcionadas (índices de satisfacción y de optimización), lo que puede mejorar considerablemente la calidad del apoyo en la decisión.

Aplicamos este enfoque a datos reales de los bosques de Nueva Caledonia, un punto crítico de la biodiversidad que se enfrenta a muchos retos para conservar su biodiversidad. El contexto desarrollado, insular y poco poblado de este archipiélago, permite una estrecha proximidad entre los distintos actores de la conservación, lo que lo convierte en un terreno de estudio apropiado para experimentar nuevas herramientas de conservación. Hemos ilustrado esta particularidad a través de un estudio de caso realizado en estrecha colaboración con los gestores del parque provincial Côte Oubliée – *Woen Vùù – Pwa Preeù*. En este estudio proporcionamos ayuda en la toma de decisiones para un proyecto de reforestación, centrándonos en la reducción de la fragmentación y la mejora de la conectividad estructural. En general, hemos demostrado la generalidad, la flexibilidad y la expresividad del enfoque basado en restricciones aplicado a la PSC. Nuestros resultados también han abierto nuevas perspectivas para el apoyo en la toma de decisiones en Nueva Caledonia, la PSC y la programación por restricciones.

Palabras clave: planificación sistemática de la conservación, apoyo en la decisión, conservación forestal, planificación de la restauración ecológica, inteligencia artificial, programación por restricciones, Nueva Caledonia.



Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2021.a36793>
Droit d'auteur © 2021, Bois et Forêts des Tropiques © Cirad
Date de publication : 1^{er} septembre 2021



Licence Creative Commons :
Attribution - Pas de Modification 4.0 International.
Attribution-4.0 International (CC BY 4.0)

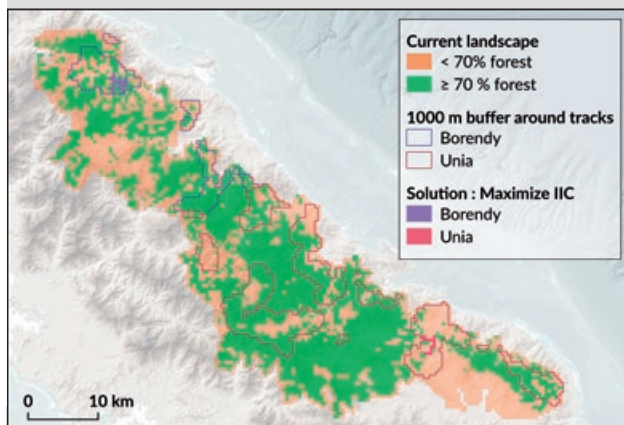


Figure 1. Cartographie d'une solution optimale produite par notre approche dans le cadre du projet de reforestation du parc provincial de la Côte Oubliée – *Woen Vûû – Pwa Pereeû*. L'objectif était de délimiter des zones propices à la reforestation qui : (i) sont situées dans des zones dégradées, (ii) sont accessibles depuis le réseau de pistes actuel, (iii) sont connectées et compactes pour réduire les coûts de gestion, (iv) sont équitablement réparties entre les deux districts coutumiers du parc (Borendy et Unia) afin d'impliquer les deux communautés dans le projet et (v) respectent les contraintes budgétaires de la Province Sud (environ 200 ha à investir dans la reforestation). Ces zones ont été automatiquement délimitées de manière à satisfaire les contraintes précédentes tout en maximisant la connectivité structurelle du couvert forestier potentiel résultant de la reforestation. La connectivité structurelle a été mesurée avec l'indice intégral de connectivité (IIC, Pascaul-Hortal et Saura, 2006).

Figure 1. Map of an optimal solution produced by our approach for the “Côte Oubliée – *Woen Vûû – Pwa Pereeû*” provincial park reforestation project. The aim was to delineate two areas suitable for reforestation that: (i) are located in degraded areas, (ii) are accessible from the current forest road network, (iii) are connected and compact to reduce management costs, (iv) are equitably allocated between the two customary districts of the park (Borendy and Unia) to involve both communities in the project, and (v) keep within the budgetary constraints of the South Province (investment budget earmarked for ~200 ha of reforestation). These areas were automatically delineated to satisfy the previous constraints while maximising the structural connectivity of the potential forest landscape resulting from reforestation. Structural connectivity was measured with the Integral Index of Connectivity (IIC, Pascaul-Hortal and Saura, 2006).

Figura 1. Cartografía de una solución óptima producida por nuestro enfoque en el marco del proyecto de reforestación del Parque Provincial Côte Oubliée – *Woen Vûû – Pwa Pereeû*. El objetivo era identificar las zonas aptas para la reforestación que: (i) están situadas en zonas degradadas, (ii) son accesibles desde la red de pistas existente, (iii) están conectadas y son compactas para reducir los costes de gestión, (iv) están distribuidas equitativamente entre los dos distritos tradicionales del parque (Borendy y Unia) para implicar a ambas comunidades en el proyecto, y (v) respetan las limitaciones presupuestarias de la Provincia Sur (unas 200 ha que se invertirán en reforestación). Estas zonas se delimitaron automáticamente para satisfacer las restricciones mencionadas y maximizar la conectividad estructural de la cubierta forestal potencial resultante de la reforestación. La conectividad estructural se midió con el índice de conectividad integral (IIC, Pascaul-Hortal y Saura, 2006).

Photo 1.

Le parc provincial de la Côte Oubliée – *Woen Vûû – Pwa Pereeû*. Créée en avril 2019 par la Province Sud de Nouvelle-Calédonie, cette aire protégée couvre 93 000 ha de zone terrestre et 27 000 ha de zone marine. La création du parc provincial a permis à la Province Sud de Nouvelle-Calédonie d'atteindre l'objectif d'Aichi 11 (au moins 17 % des zones terrestres protégées et 10 % des zones marines et côtières protégées). Les méthodes développées dans le cadre de cette thèse ont permis d'identifier des zones d'intérêt pour la reforestation, respectant les contraintes des gestionnaires tout en maximisant les bénéfices potentiels pour la connectivité et la réduction de la fragmentation forestière dans le parc provincial.

Photo N. Rinck.

Photo 1.

The “Côte Oubliée” (*Woen Vûû – Pwa Pereeû*) provincial park. Created in April 2019 by New Caledonia's South Province, this protected area covers a land area of 93,000 ha and a marine area of 27,000 ha. Thanks to the park's creation, New Caledonia's South Province has achieved the Aichi 11 objective (at least 17% of protected land area and 10% of protected marine and coastal areas). The methods developed during this thesis allowed the identification of areas of interest for reforestation that comply with management constraints while maximizing the potential benefits for connectivity and reducing forest fragmentation in the provincial park.

Photo N. Rinck.

Foto 1.

Parque Provincial Côte Oubliée – *Woen Vûû – Pwa Pereeû*. Creada en abril de 2019 por la Provincia Sur de Nueva Caledonia, esta zona protegida abarca 93 000 ha de zona terrestre y 27 000 ha de zona marina. La creación del Parque Provincial ha permitido a la Provincia Sur de Nueva Caledonia alcanzar el objetivo de Aichi 11 (al menos el 17 % de las zonas terrestres y el 10 % de las zonas marinas y costeras están protegidas). Los métodos desarrollados durante esta tesis permitieron identificar las áreas de interés para la reforestación, respetando las restricciones de los gestores y maximizando al mismo tiempo los beneficios potenciales para la conectividad y la reducción de la fragmentación forestal en el parque provincial.

Foto N. Rinck.

Grade et diplôme : Doctorat

Université : Université de Montpellier, France

Date de soutenance : 15 décembre 2020

Composition du jury :

Direction : Philippe BIRNBAUM (directeur, CIRAD, UMR AMAP)

Xavier LORCA (co-directeur, IMT Mines Albi)

Membres : Ana RODRIGUES (présidente, CNRS, CEFE)

François MUNOZ (rapporteur, Université Grenoble-Alpes)

Christine SOLNON (rapporteur, INSA Lyon)

Jean-Jérôme CASSAN (examinateur, Direction du Développement Économique et de l'Environnement, Province Nord de Nouvelle-Calédonie)

Financements : Cirad (50%) et Institut agronomique néo-calédonien (IAC) (50%). En compléments, appuis ponctuels de l'école doctorale GAIA, de l'Institut Mines-Télécom IMT Mines Atlantique, et de l'UMR AMAP pour les missions et les conférences.

Langue de rédaction : Anglais (avec résumé en français)

Accès au manuscrit : <https://hal.archives-ouvertes.fr/>

Contact : dimitri.justeau@gmail.com

<https://dimitri-justeau.github.io/>

Liste des articles publiés

Justeau-Allaire D., Birnbaum P., Lorca X., 2018. Unifying Reserve Design Strategies with Graph Theory and Constraint Programming. In: J. Hooker (Ed.), Principles and Practice of Constraint Programming. Springer International Publishing, 507-523. https://doi.org/10.1007/978-3-319-98334-9_33

Justeau-Allaire D., Vismara P., Birnbaum P., Lorca X., 2019. Systematic Conservation Planning for Sustainable Land-use Policies: A Constrained Partitioning Approach to Reserve Selection and Design. Proceedings of the Twenty-Eighth International Joint Conference on Artificial Intelligence, 5902-5908. <https://doi.org/10.24963/ijcai.2019/818>

Justeau-Allaire D., Vieilledent G., Rinck N., Vismara P., Lorca X., Birnbaum P., 2021. Constrained optimization of landscape indices in conservation planning to support ecological restoration in New Caledonia. Journal of Applied Ecology, 58 (4): 744-754. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13803>



5th World
Congress on
Agroforestry
.....>
Transitioning to
a Viable World

The 5th World Congress on Agroforestry

July 17-20, 2022, in Québec City, Canada

On July 17-20, 2022, in Québec City, Canada, will be held the Fifth World Congress on Agroforestry: Transitioning to a Viable World. This congress will be an opportunity to stimulate an open and inclusive dialogue between various stakeholders from around the world including farmers, researchers, advisors, policy makers, and representatives from the government, the civil society and the private sector. Considering agroforestry participates in enhancing soil health, protecting water quality, increasing biodiversity, mitigating and adapting to climate change, and providing food security, health and revenues, it is an essential component of the needed ecological, energetic, social and economic transition. This critical transition can and must be achieved through a participatory collaboration process that helps building bridges between research, policy decisions and field work.

The Fifth World Congress on Agroforestry will help creating or strengthening those connections by promoting knowledge sharing for a transition to a unified and healthy world.

Information:

<https://agroforestry2022.org/en>

AIRES PROTÉGÉES D'AFRIQUE CENTRALE – État 2020

OFAC-COMIFAC et UICN, 402 P.



L'État des aires protégées d'Afrique centrale 2020 met un accent particulier sur des données actualisées, permettant de dresser un portrait harmonisé du réseau d'aires protégées de l'ensemble de la sous-région. Il montre, sans ambiguïtés, que les réseaux nationaux et le réseau sous-régional ont été fortement renforcés mais qu'ils font face à de nombreux défis. Des analyses détaillées, destinées à éclairer les décideurs et les gestionnaires, explorent diverses thématiques à peine esquissées dans le précédent volume (gouvernance, écotourisme...), voire pas traitées du tout (conflits homme-éléphant, transhumance, mines et industrie pétrolière...). Ce document montre l'importance des aires protégées pour le développement durable de l'Afrique centrale : il a pour objectif de contribuer à un dialogue multisectoriel et à leur meilleure intégration dans les stratégies de développement des pays.

The State of Protected Areas in Central Africa 2020 places particular emphasis on updated data, allowing for a harmonized picture of the protected area network across the subregion. It shows, without ambiguity, that national networks and the subregional network have been strengthened considerably, but that they face many challenges. Detailed analyses, intended to inform decisionmakers and managers, explore various themes barely touched upon in the previous volume (governance, ecotourism, etc.), or not addressed at all (human-elephant conflicts, transhumance, mining and oil industry, etc.). This document demonstrates the importance of protected areas for the sustainable development of Central Africa. It aims to contribute to a multisectoral dialogue and to the better integration of protected areas in national development strategies.



Accès libre : <https://www.observatoire-comifac.net/publications/edap>