

Bois & forêts des tropiques

1^{er} trimestre 2021
n° 347

Bois & forêts des tropiques

Revue éditée par le Cirad
n° 347 / 1^{er} trimestre 2021

Rédacteur en chef

Jean-François Trébuchon

Rédacteurs scientifiques

Kévin Candelier

Antoine Galiana

Valéry Gond

Jean Gérard

Dominique Louppe

Jacques Tassin

Coordination éditoriale

Jean-François Trébuchon

Comité éditorial 2020-2022

Seheno Andriantsaralaza (Madagascar)

Samuel Assembe-Mvondo (Cameroun)

Loïc Brancherier (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)

Franck 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

Traducteurs

Ilona Bossanyi

Anna Lon Quintana

Service de presse

Laurence Campas

Webmestre

Jean-François Trébuchon

Directeur de publication

Michel Eddi



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 le site web :

revues.cirad.fr

© Bois et forêts des tropiques © Cirad

ISSN 0006-579X

Dépôt légal : février 2021

283997X - Imprimé en France par Jouve S.A.

11, boulevard Sébastopol, BP 2734

75027 Paris Cedex 01, France

Maquette : J.-J. Gonod, Montpellier

Numéro d'inscription à la CPPP : 59465

Directeur gérant : Michel Eddi

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>



Effet du brûlis sur le feuillage
suite à l'installation de cultures de
cacao dans la forêt classée de la
Bossématié en Côte d'Ivoire.
*Slash-and-burn effect on foliage
following the establishment of
cocoa cultivation in the Bossématié
classified forest in Côte d'Ivoire.*

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*.

LE POINT SUR...

- Soudage rotatif de bois de *Dalbergia sissoo* : assemblage longitudinal à tenon et mortaise et à plat-joint** 3
 S. KUMAR, S. SHUKLA, K. KANT SHUKLA
- Revue systématique des plantes médicinales antipaludiques utilisées en République démocratique du Congo** 11
 B. I. W. RUSAATI, A. P. GENDUSA, S. H. JOO, J. W. PARK, N. C. MASUMBUKO, K. G. IRAGI, K.-T.-N. NGBOLUA, M. A. FURAHA, N. K. ROLLY, J. W. KANG
- Variabilité des utilisations de *Diospyros mespiliformis* Hochst. suivant les facteurs sociodémographiques au Nord-Bénin** 29
 A. DAANON, E. A. PADONOU, B. A. AKAKPO, M. HOUINATO
- Caractérisation et variabilité des propriétés physiques et structurales du bois du kevingo, *Guibourtia tessmannii*, et de l'okoumé, *Aucoumea klaineana*, provenant des forêts naturelles du Gabon** 41
 J.-L. ZUE ONDO, J. RUELLE, J. DLOUHÁ, M. FOURNIER
- Potentialité des données satellitaires Sentinel-2 pour la cartographie de l'impact des feux de végétation en Afrique tropicale : application au Togo** 59
 Y. KONKO, B. AFELU, K. KOKOU
- Cartographie des déterminants de l'invasion par le pin maritime, *Pinus pinaster* Ait., de la subéraie de Haddada dans le nord-est de l'Algérie** 77
 A. MELIANI, M. GANA, M. E. H. BENDERRADJI, K. BEN YAHIA, D. ALATOU
- Changements d'occupation et d'usage des terres entre 2016 et 2019 dans le Sud-Est de la Côte d'Ivoire : impact des cultures de rente sur la forêt** 89
 T. A. OUATTARA, K. F. KOUAMÉ, I. C. ZO-BI, R. VAUDRY, C. GRINAND

DESCRIPTIF TECHNIQUE

- Publication de descriptifs techniques extraits de l'*Atlas des bois tropicaux*** 105
 J. GÉRARD
- Descriptif technique d'essence tropicale – L'Azobé** 107
- Descriptif technique d'essence tropicale – Bilinga** 113

RÉSUMÉ DE THÈSE

- Évaluation de différents scénarios de gestion des tourbières pour réduire les émissions de GES dues aux incendies. Une étude de cas dans les tourbières tropicales d'Ogan Komering Ilir, en Indonésie.** 119
 M. J. RODRÍGUEZ VÁSQUEZ

VOS LECTURES

- 28 – 58 – 76
- Atlas critique de la Guyane.** 121
 NOUCHER M., POLIDORI L. (Dirs).

ACTES DE CONFÉRENCES

- 7^{es} rencontres annuelles de IAWA-Groupe Chine : Renforcer la protection et l'utilisation des ressources forestières, élargir le champ de recherche de l'anatomie du bois et de la science du bois. Lin-an, Zhejiang, Chine. 28-29 novembre 2020.** 10

CONFÉRENCES INTERNATIONALES

- Conférence WEF Nexus Science Advances reportée en mai 2021.** 122
- Conférence sur les avancées scientifiques des Nexus eau-énergie-alimentation-écosystèmes dans la région méditerranéenne. Nicosia, Chypre. 27-29 mai 2021.**





FOCUS ON...

- Rotational wood welding of *Dalbergia sissoo* wood: forming longitudinal tongue-and-groove and butt joints** 3
 S. KUMAR, S. SHUKLA, K. KANT SHUKLA
- A systematic review of antimalarial medicinal plants in Democratic Republic of the Congo** 11
 B. I. W. RUSAATI, A. P. GENDUSA, S. H. JOO, J. W. PARK, N. C. MASUMBUKO, K. G. IRAGI, K.-T.-N. NGBOLUA, M. A. FURAH, N. K. ROLLY, J. W. KANG
- Variability in uses of *Diospyros mespiliformis* Hochst. according to socio-demographic factors in northern Benin** 29
 A. DAANON, E. A. PADONOU, B. A. AKAKPO, M. HOUINATO
- Characterisation and variability of physical and structural properties of Kevazingo, *Guibourtia tessmannii*, and Okoumé, *Aucoumea klaineana*, wood from natural forests in Gabon** 41
 J.-L. ZUE ONDO, J. RUELLE, J. DLOUHÁ, M. FOURNIER
- Potential of Sentinel-2 satellite data to map the impacts of bush fires in tropical Africa: application in Togo** 59
 Y. KONKO, B. AFELU, K. KOKOU
- Mapping the determinants of invasion by maritime pine, *Pinus pinaster* Ait., in the Haddada cork oak woods in northeastern Algeria** 77
 A. MELIANI, M. GANA, M. E. H. BENDERRADJI, K. BEN YAHIA, D. ALATOU
- Changes in land cover and land use from 2016 to 2019 in south-east Côte d'Ivoire: impacts of cash crops on forests** 89
 T. A. OUATTARA, K. F. KOUAME, I. C. ZO-BI, R. VAUDRY, C. GRINAND

TECHNICAL DESCRIPTION

- Publishing of technical descriptions extracted from the Tropical Timber Atlas** 105
 J. GÉRARD
- Technical description of tropical species. The Azobé / Ekki** 107
- Technical description of tropical species. The Bilinga / Opepe** 113

PHILOSOPHIÆ DOCTOR ABSTRACT

- Evaluation of different peatland management scenarios to reduce GHG emissions from fires. A case study in tropical peatlands in Ogan Komering Ilir, Indonesia.** 119
 M. J. RODRÍGUEZ VÁSQUEZ

BOOK REVIEW

- 28 – 58 – 76
- Atlas critique de la Guyane.** 121
 NOUCHER M., POLIDORI L. (Dir.).

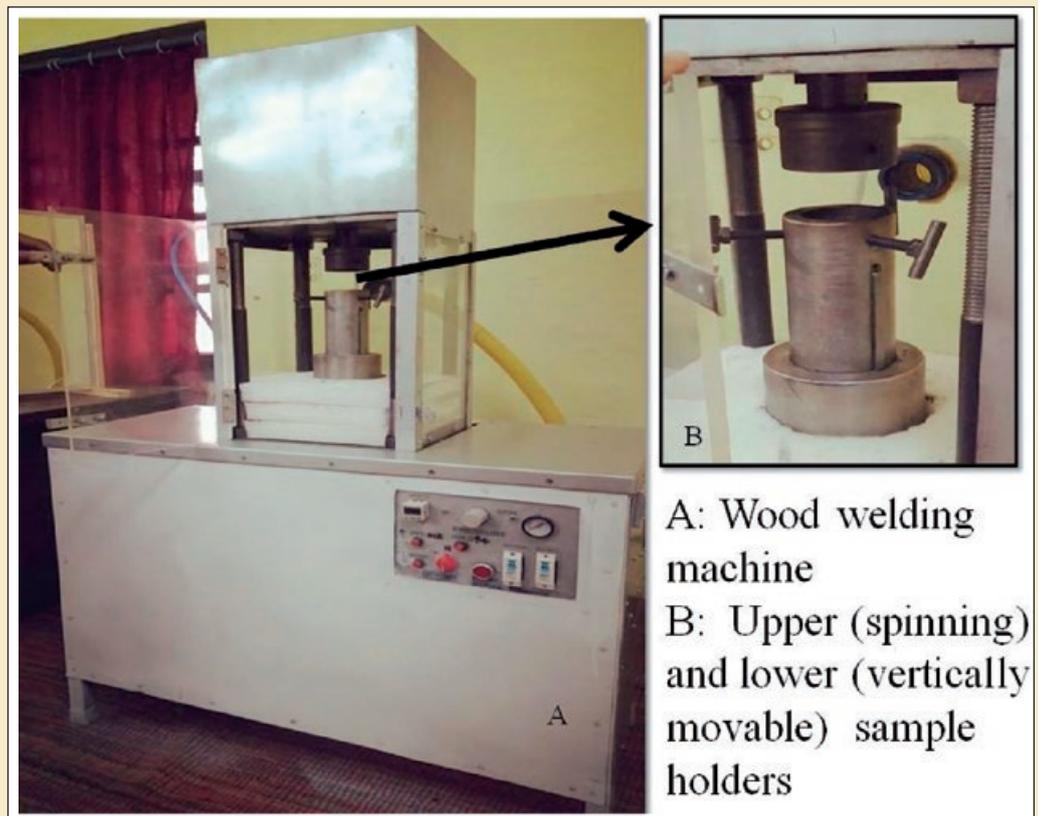
CONFERENCE PROCEEDINGS

- 7th Annual Meeting of the IAWA-China Group: Strengthening the protection and utilization of forestry resources, broadening research field of wood anatomy and wood science. Lin-an, Zhejiang, China. 28-29 November, 2020.** 10

INTERNATIONAL CONFERENCES

- WEFE Nexus Science Advances conference postponed to May 2021. Conference on Water-Energy-Food-Ecosystems Nexus scientific advances in the Mediterranean region. Nicosia, Cyprus. 27-29 May 2021.** 122

Rotational wood welding on *Dalbergia sissoo*: forming longitudinal tongue-and-groove and butt joints



Photos 1.
Wood welding machine.

Shailendra KUMAR¹
Shikhar SHUKLA¹
Krishna KANT SHUKLA¹

¹ Forest Research Institute
Forest Products Division
Dehradun
India

**Auteur correspondant /
Corresponding author:**
Shailendra KUMAR –
kumarsro@icfre.org

Doi : 10.19182/bft2021.347.a31865 – Droit d’auteur © 2021, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 1^{er} mai 2020 ;
date d’acceptation : 29 janvier 2020 ; date de publication : 25 février 2021.



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

Citer l’article / To cite the article

Kumar S., Shukla S., Kant Shukla K., 2021. Rotational wood welding on *Dalbergia sissoo*: forming longitudinal tongue-and-groove and butt joints. Bois et Forêts des Tropiques, 347: 3-9. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2021.347.a31865>

RÉSUMÉ

Soudage rotatif de bois de *Dalbergia sissoo* : assemblages longitudinaux à tenon et mortaise et à plat-joint

Les techniques d'assemblage sont de première importance dans le processus de fabrication de produits bois. Les assemblages sont le plus souvent réalisés à l'aide de différents types de colles. Le soudage du bois constitue une réelle innovation en matière d'assemblage en utilisant la friction en deux pièces de bois pour en assurer l'adhésion par ramollissement et migration de composants du bois. Dans cette étude, un dispositif rotatif a été adapté et utilisé pour souder des pièces de bois de *Dalbergia sissoo*. Des assemblages à plat-joint et de type tenon-mortaise ont été réalisés à l'aide de ce dispositif. La résistance à la traction des assemblages a été étudiée. L'influence de l'augmentation de la surface soumise à friction sur la résistance des assemblages en utilisant un système tenon-mortaise a été analysée. La résistance à la traction d'assemblages à plat-joint soudés par friction à 1 200 tr/min a été estimée à 5,3 MPa. La résistance des joints a été améliorée de 66 % avec un assemblage tenon-mortaise. L'influence du temps de friction sur la température de soudage a été aussi étudiée. La finalité de cette étude est de développer l'utilisation de la technique de soudage au bois de *D. sissoo* pour améliorer la résistance de ses assemblages.

Mots-clés : soudage, friction rotative, *Dalbergia sissoo*, menuiserie, assemblage à plat-joint, tenon-mortaise, résistance à la traction, Inde.

ABSTRACT

Rotational wood welding of *Dalbergia sissoo* wood: forming longitudinal tongue-and-groove and butt joints

Wood joinery is an essential part of wood-working for product manufacture. Wood sections are mostly joined together with adhesives. Wood welding brings a new dimension to joinery by using mechanical friction to induce a flow of wood components ensuring adhesion. In this study, a customized spin wood-welding machine was used to join wood sections of *Dalbergia sissoo*. Butt and tongue-and-groove joints were prepared and welded using the machine. The tensile strength of the joints was tested. The impact on joint strength of increasing the friction area by introducing tongue-and-groove joints was tested and analyzed. The tensile strength for butt joints at 1,200 rpm welding was estimated at 5.3 MPa. Joint strength was found to increase substantially (by 66%) with a tongue-and-groove welding section. Weld line temperatures at different spin times were also investigated. The aim of this study is to apply welding technology to *Dalbergia sissoo* to achieve greater joint strength.

Keywords: welding, rotational friction, *Dalbergia sissoo*, butt joint, joinery, tongue-and-groove joint, tensile strength, India.

RESUMEN

Soldadura por rotación en la madera de *Dalbergia sissoo*: unión longitudinal machihembrada y unión a tope

La carpintería de la madera es una parte esencial del trabajo de la madera en la fabricación de productos. Las secciones de madera se unen mayoritariamente con adhesivos. La soldadura de la madera aporta una nueva dimensión a la carpintería al utilizar la fricción mecánica para inducir un flujo de componentes de madera que garantice la adhesión. En este estudio se utilizó una máquina de soldadura de madera por fricción adaptada para unir secciones de madera de *Dalbergia sissoo*. Las uniones a tope y machihembradas se prepararon y soldaron con esta máquina. Se comprobó la resistencia a la tracción de las uniones. Se analizó el efecto en la resistencia de las uniones debido al aumento del área de fricción al utilizar juntas machihembradas. La resistencia a la tracción de las uniones a tope en una soldadura a 1 200 rpm se estimó en 5,3 MPa. Se comprobó que la resistencia de la unión aumentaba sustancialmente (en un 66 %) con una sección de soldadura machihembrada. También se midieron las temperaturas de la línea de soldadura con diferentes tiempos de fricción. El objetivo de este estudio es aplicar la tecnología de la soldadura a *Dalbergia sissoo* para conseguir una mayor resistencia de unión.

Palabras clave: soldadura, fricción por rotación, *Dalbergia sissoo*, unión a tope, carpintería, machihembrado, resistencia a la tracción, India.

Introduction

Thousand tons of petrochemical-based glues are used every year across the globe. The use of glues for wood joinery is associated with high cost of investment and long curing time (Pizzi *et al.*, 2004). Most of the glues are known to possess negative environmental effect. Wood welding was first demonstrated by Suthoff *et al.* (1996). Eco-friendly processing techniques for renewable materials like wood may offer great advantages over other comparable materials, which have higher environmental burdens. Wood welding is a technique to join wooden pieces by frictional heat without any glue. Friction is induced between wood surfaces, which causes melting and flowing of mostly lignin to weld line, which works as adhesive after cooling and setting (Gfeller *et al.*, 2004). The studies undertaken on this topic can generally be categorised into two groups: rotational welding (dowel) and linear friction vibration welding. Significant studies have been carried out on friction vibration welding of wood (Pizzi *et al.*, 2004; Omrani *et al.*, 2007; Resch *et al.*, 2006; Gfeller *et al.*, 2004; Leban *et al.*, 2004; Amirou *et al.*, 2017). Most of the studies carried out are on European timbers like *Picea abies*, *Fagus sylvatica*, *Quercus robur*, *Acer* spp. Moreover, no work reported on rotational welding of tongue-and-groove joint. Aim of this study is to carry out some exploratory rotational wood welding on an Indian timber *Dalbergia sissoo* and compare the effect of tongue-and-groove welded joints over butt joints.

Materials and Methods

The wood welding machine

A customized spin wood welding machine was fabricated. The machine has two shafts with holders placed vertically: lower and upper (photos 1). The upper shaft can rotate at set revolution per minute (rpm) up to maximum 5,000 rpm. Lower shaft is a stationary part and is fitted with movable spindle, which can go up and down and impart pressure on upper rotating wood specimen through wood specimen at its shaft. Both upper and lower shafts have specimen holder in which cylindrical wood specimens can be clamped as shown in figure 1. During wood welding, the lower shaft (with wooden specimen) moves upward and allows the vertically moving wooden specimen to meet upper rotating wood specimen at required weld pressure, weld time, hold pressure, hold time. The welding shafts are surrounded with a box made of transparent fiber sheet. A smoke exhaust system is also installed within the box to remove smoke generated during welding.

Wood specimens

Butt joint in longitudinal direction

Kiln dried wood planks of *Dalbergia sissoo* (both heartwood and sapwood portion) of thickness 55 mm were taken and converted into square specimens of cross section 55 x 55 mm². The kiln drying was done in accordance with seasoning schedule No. IV (IS: 1141, 1993). The planks were dried to moisture content range of 8-12%. Wood specimens were turned into cylindrical form with diameter 47 mm and length 50 mm.

Tongue-and-groove (TG) joint in longitudinal direction

For tongue-and-groove (TG) joints in longitudinal direction, a tongue (diameter = 17 mm, length = 13 mm) in longitudinal direction was made during turning, making total sample length 63 mm in longitudinal direction as shown in figure 2 and photo 2. For groove, a hole (diameter = 17 mm, depth = 12 mm) was drilled in the cylindrical specimens in longitudinal direction. All the prepared specimens were conditioned to 10% moisture content, which was evaluated with the help of reference samples by oven dry method.

Recording temperature at weld line

A PT-100 sensor was inserted just beneath the weld line surface into the lower wood specimen (stationary)

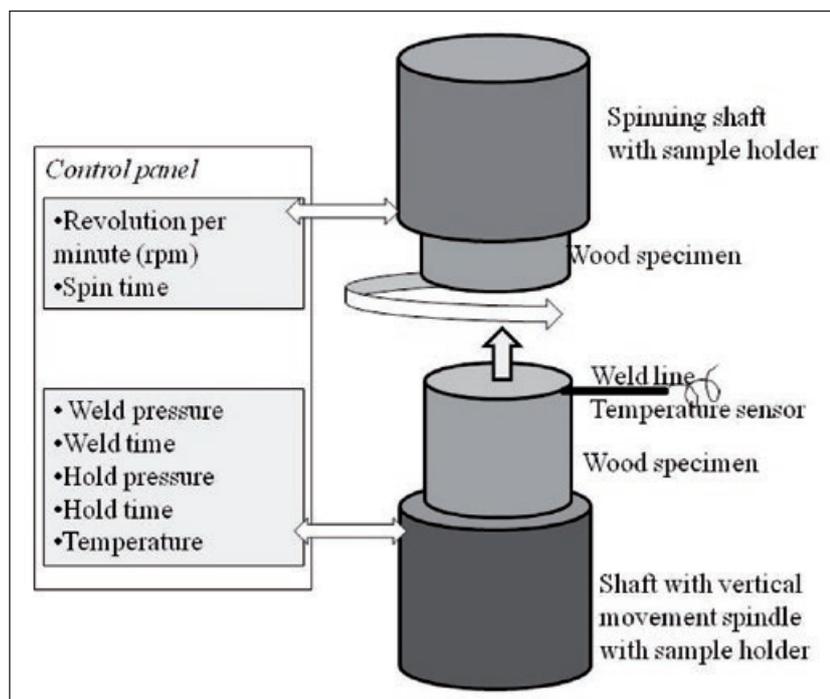


Figure 1.
Diagrammatic representation of wood welding system.

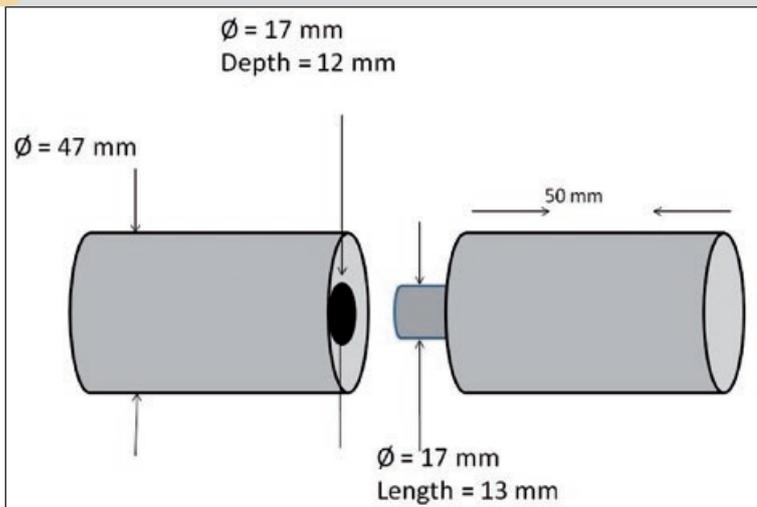


Figure 2.
Diagrammatic representation of tongue-and-groove wood welding samples.



Photo 2.
Tongue-and-groove wood welding samples.

by drilling a hole. The tip of the sensor was placed in such a way that it was 1 mm below the joint line as shown in photo 1. The sensor was connected to the control box and PC to record the temperature during welding at an interval of one second.

Table I.

Parameters used for spin friction.

Revolutions per minute	1,200
Butt joint TG joint	Spin time
	15 s
	12 s 15 s 18 s
Spin pressure	2.55 MPa
Holding pressure (after spinning)	5.10 MPa
Holding time (after spinning)	40 s

Welding

The cylindrical wood specimens were mounted on the both upper and lower holders and spin welding process were done with parameters shown in table I.

Twenty specimens were welded to make 10 welded sets for butt joint and the same was followed for TG joint. After two hours of welding, the welded specimens were tested for tensile strength. Twelve separate specimens were prepared for recording weld line temperature. Four samples each were used for different weld time (12 s, 15 s & 18 s). However, due to hole for insertion of the PT-100 sensor as shown in photo 3, these specimens were not tested for tensile strength.

Tensile strength testing

Welded cylindrical sections were then subjected to static tensile stress to investigate the strength of joints. Specimens were hinged tightly to the jaws on Universal Testing Machine (UTM) and tensile stress was applied with the machine head moving at the constant rate of 1 mm/min (in accordance with IS: 1708 Indian Standard - *Methods of Testing of Small Clear Specimens of Timber*) as shown in photo 4. Maximum tensile load at which the joint ruptures was recorded and tensile stress per unit area was evaluated in MPa.

Results and Discussion

Weld line temperature

During friction wood welding, a substantial amount of heat is generated at the weld line. This heat melts some amorphous polymer materials like lignin and hemicelluloses (Omrani *et al.*, 2007). Figures 3 to 5 present line curve for temperature of weld line during welding. From above figures (figures 3 to 5), it can be seen that the temperature curve has three distinct regions as suggested by Ganne-Chédeville *et al.* (2006b): zone of sudden temperature increase (0 s to 20 s), temperature stabilization (20 s to 25 s) and temperature decrease after welding stops. As shown in above figures, in general, the maximum

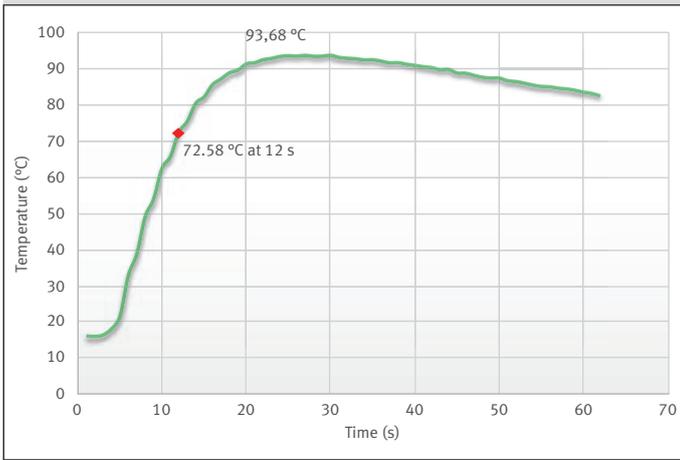


Figure 3.
Weld line temperature at 12 s weld time.

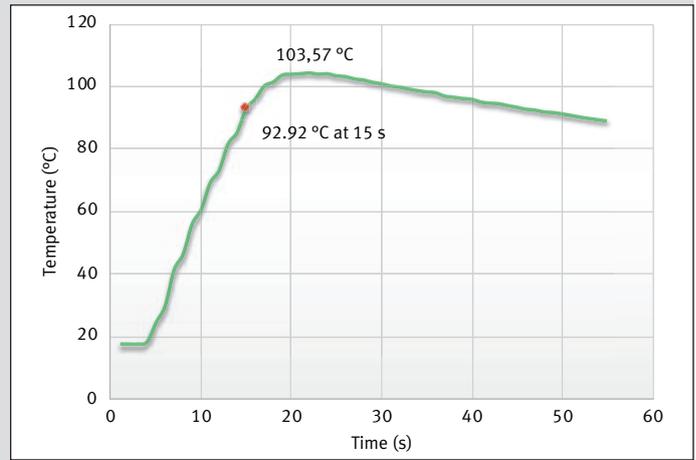


Figure 4.
Weld line temperature at 15 s weld time.

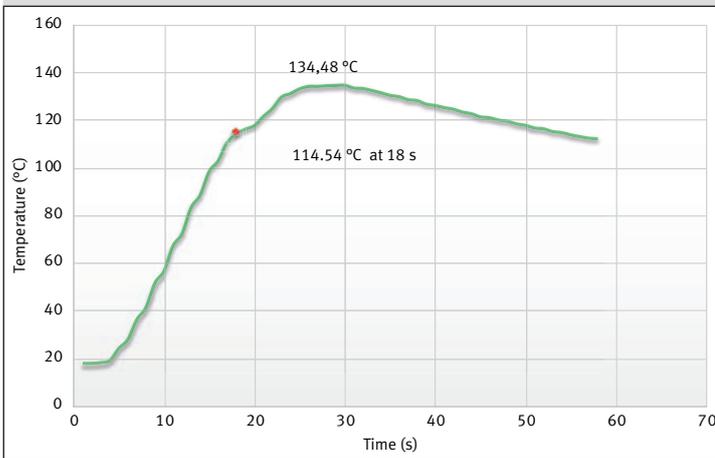


Figure 5.
Weld line temperature at 18 s weld time.

temperature increases as welding time increases (from 12 s to 18 s). Maximum average temperatures during welding were 93.68 °C, 103.57 °C and 134.48 °C for 12 s, 15 s and 18 s welding times respectively. Ganne-Chédeville *et al.* (2006a) reported average maximum temperature of weld line to be 165 °C during welding of Maple wood. The maximum average temperature is far less than as reported by Ganne-Chédeville *et al.* (2006b) who found it to be in range of 216-223 °C in linear friction welding using infrared thermography. Zhang *et al.* (2017) also reported that using type K thermocouples, welding interface reaches 350 °C in six seconds. However, these literature reports are on weld line temperature of linear friction.

Use of different techniques for temperature recording by different workers may be one of the reasons for difference temperatures apart from different sets of parameters used during welding. The maximum temperatures in this study did not coincide with the end of spin time. Maximum temperature reached at 31 s, 24 s



Photo 3.
Recording weld line temperature using PT-100 type thermo-couple.



Photo 4.
Tensile strength testing.

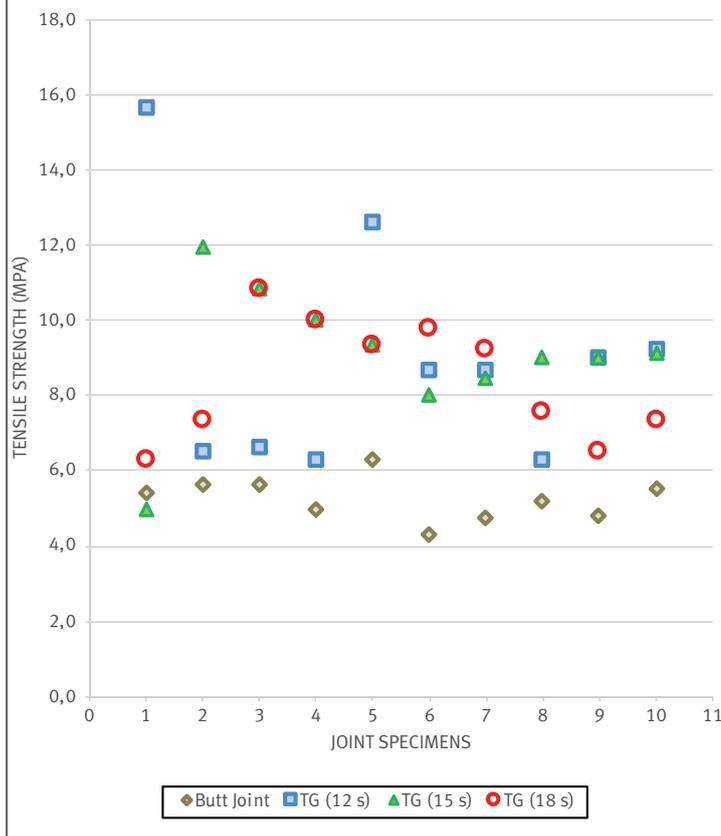


Figure 6.
Tensile strength of welded specimens.

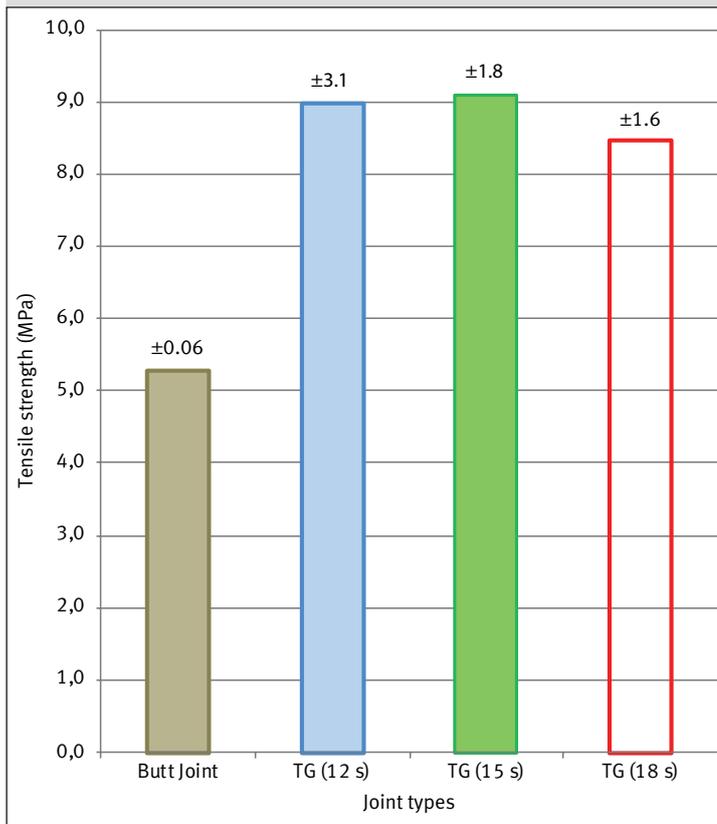


Figure 7.
Mean tensile strength of welded specimens.

and 30 s at spin time 12 s, 15 s and 18 s respectively. This indicates two possible reasons: after all the mechanical energy was transferred to weld line, the temperature kept on rising even after friction was stopped, and second, there might be some problems with the choice of the temperature sensor. However, in any case, the maximum temperature seems to be realistic.

Tensile strength

Figure 6 presents tensile strengths of the welded joints: rotational welded butt joints, tongue-and-groove joints.

From figure 7, it can be seen that the mean strength of the butt-jointed specimens was 5.3 ± 0.6 MPa. Mean joint strength in case of TG specimens were 9.0 ± 3.1 MPa for 12 s spin time, 9.1 MPa and 8.5 MPa for 15 s and 18 s spin times. The results of the strength values are comparable to those reported by Properzi *et al.* (2005) and Boonstra *et al.* (2006). Working on vibration wood welding on three species beech, oak and maple, Properzi *et al.* (2005) found the joint strength in range of 7.6 MPa-8.2 MPa (beech), 3.1 MPa-7.5 MPa (oak) and 9.2 MPa-10.7 MPa (maple) when the weld time varied from 3 s to 5 s.

Boonstra *et al.* (2006) also reported joint strength of untreated birch and beech to be 5.97 MPa and 8.61 MPa when welded through vibration wood welding at 3 s.

Similar results have been reported by Ganne-Chédeville *et al.* (2006a) on maple wood welding.

Figures 6 & 7 present the strength values. It can be seen that in general, all the TG specimens showed higher strength values than that of butt jointed specimens. However, the spread of the data was higher in case of TG specimens. Such higher standard deviations have also been reported by other researchers (Properzi *et al.*, 2005). ANOVA analysis reveals that the strength values of butt joint were significantly different from that of TG specimens ($df = 3$, $n = 36$, $p \leq 0.001$). However, there was no significant difference among the TG specimen's strength values. Thus, the mean strength value for tongue-and-groove specimens was 8.8 MPa. The surface area increase in TG specimens is 23% which results into a huge increase of 66% in strength of TG specimens due to inclusion of tongue on the welding surface. This 23% increased joint area is in longitudinal direction rather than cross section. Thus, apparently, the TG specimens have two welding directions: cross section and longitudinal. Fiber orientation has been reported to influence substantially the bond strength. Cross grain bonding yields much lower strength than that observed for bonding with grains parallel to each other. (Properzi *et al.*, 2005; Kocks *et al.*, 2000).

Conclusion

Solid wood adhesion has been achieved by rotational friction between the surfaces of *Dalbergia sissoo*. The tensile strength of welded butt joint produced by rotation at 1,200 rpm for 15 seconds is found to be 5.3 MPa. The joint strength is increased substantially (by 66%) by incorporating a tongue-groove at welding section. Weld line temperature increases as welding time is increased. For welding time 12 s, 15 s and 18 s, maximum weld line temperature observed were 93.68 °C, 103.57 °C and 134.48 °C respectively. It is inferred that tongue-groove joint welded in the longitudinal direction of *Dalbergia sissoo* can be used as an interior grade wood joint and has a significantly greater strength than that of welded butt joint in the same direction.

References

Amirou S., Pizzi A., Belleville B., Delmotte L., 2017. Water resistance of natural joint of spruce produced by linear friction welding without any treatment. *International Wood Products Journal*, 8 (4): 201-207. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/20426445.2017.1389834?journalCode=ywpi20>

Boonstra M., Pizzi A., Ganne-Chédeville C., Properzi M., Leban J.-M., Pichelin F., 2006. Vibration welding of heat-treated wood. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 20 (4): 359-369. <https://doi.org/10.1163/156856106776381758>

Ganne-Chédeville C., Properzi M., Pizzi A., Leban J.-M., Pichelin F., 2006a. Parameters of wood welding: A study with infrared thermography. *Holzforschung*, 60: 434-438. <https://doi.org/10.1515/HF.2006.068>

Ganne-Chédeville C., Leban J.-M., Properzi M., Pichelin F., Pizzi A., 2006b. Temperature and density distribution in mechanical vibration wood welding. *Wood Science and Technology*, 40: 72-76. <https://doi.org/10.1007/s00226-005-0037-6>

Gfeller B., Pizzi A., Zanetti M., Properzi M., Pichelin F., Lehmann M., Delmotte L., 2004. Solid wood joints by in situ welding of structural wood constituents. *Holzforschung*, 58: 45-52. <https://doi.org/10.1515/HF.2004.007>

IS: 1141, 1993. Seasoning of Timber – Code of Practice. Second revision. New Delhi, India, Bureau of Indian Standards, 33 p. <https://law.resource.org/pub/in/bis/S03/is.1141.1993.pdf>

Kocks F., Tomé C. N., Wenk H.-R., 2000. Texture and anisotropy: Preferred orientation in poly-crystals and their effect on materials properties. Cambridge University Press, 688 p. https://www.researchgate.net/publication/269037836_Texture_and_Anisotropy_Prefered_Orientations_in_Poly-crystals_and_Their_Effect_on_Material_Properties

Leban J.-M., Pizzi A., Wieland S., Zanetti M., Properzi M., Pichelin F., 2004. X-ray microdensitometry analysis of vibration-welded wood. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 18 (6): 673-685. <https://doi.org/10.1163/156856104839310>

Omrani P., Bocquet J.-F., Pizzi A., Leban J.-M., Mansouri H. R., 2007. Zig-zag rotational dowel welding for exterior wood joints. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 21 (10): 923-933. <https://doi.org/10.1163/156856107781393910>

Pizzi A., Leban J.-M., Kanazawa F., Properzi M., 2004. Wood dowel bonding by high-speed rotation welding. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 18 (11): 1263-1278. <https://doi.org/10.1163/1568561041588192>

Properzi M., Leban J.-M., Pizzi A., Wieland S., Pichelin F., Lehmann M., 2005. Influence of grain direction in vibrational wood welding. *Holzforschung*, 59: 23-27. <https://doi.org/10.1515/HF.2005.004>

Resch L., Desores A., Pizzi A., Bocquet J.-F., Leban J.-M., 2006. Welding-through doweling of wood panels. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 64: 423-425. <https://doi.org/10.1007/s00107-005-0090-8>

Suthoff B., Schaaf A., Hentschel H., Franz U., 1996. German Patent No. DE 196 20 273 C2.

Zhang M., Zhang Z., Tang K., Mao C., Hu Y., Chen G., 2017. Analysis of mechanisms of underfill in full penetration laser welding of thick stainless steel with a 10 kW fiber laser. *Optics & Laser Technology*, 98: 97-105. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.07.037>

Kumar *et al.* – Contribution des auteurs

Rôle du contributeur	Noms des auteurs
Conceptualization	S. Kumar
Data Curation	S. Shukla, K. Kant Shukla
Formal Analysis	S. Kumar
Funding Acquisition	S. Kumar
Investigation	S. Kumar
Methodology	S. Shukla, K. Kant Shukla
Project Administration	S. Kumar
Resources	K. Kant Shukla
Software	K. Kant Shukla
Supervision	S. Kumar
Validation	S. Kumar
Visualization	S. Kumar
Writing – Original Draft Preparation	S. Kumar
Writing – Review & Editing	S. Shukla

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

Proceedings

7th Annual Meeting of the IAWA-China Group: Strengthening the protection and utilization of forestry resources, broadening research field of wood anatomy and wood science

28-29 November 2020, Lin-an, Zhejiang, China

The Seventh Annual Meeting of IAWA-China Group was organized by the Zhejiang Agricultural and Forestry University (ZAFU), sponsored by IAWA, IUFRO (5.16.00 and 5.06.00) and IAWS together. The theme of the meeting is “Strengthening the protection and utilization of forestry resources, broadening research field of wood anatomy and wood science”, containing topics of wood anatomy and wood identification, sustainable utilization of precious timber resources, interdisciplinary integration of wood anatomy, wood collections and databases, wood anatomy of bamboo and rattan, archaeological wood and dendrochronology.

Language: English and Mandarin.

Download the proceedings:

<https://www.iufro.org/fileadmin/material/publications/proceedings-archive/51600-50600-lin-an-city20-abstracts.pdf>

Conference website:

https://www.iawa-website.org/en/Meeting/Future_Meetings/article_158.shtml



A systematic review of antimalarial medicinal plants in Democratic Republic of the Congo

Butoto Imani Wa RUSAATI^{1,2}
Arusi Patience GENDUSA³
Sung-Hyun Joo¹
Joo Won PARK¹
Cephas Ndabaga MASUMBUKO⁴
Gentil Kaboyi IRAGI²
Koto-te-Nyiwa NGBOLUA⁵
Astrid Matendo FURAHA⁶
Nkulu Kabange ROLLY^{7,8}
Jun Won KANG¹

¹ School of Forest Sciences
and Land Architecture
College of Agriculture and Life Sciences
Kyungpook National University
Daegu 41566
Republic of Korea

² Research Centre of Natural Sciences
(CRSN/Lwiro)
Department of Biology
DS Bukavu
Democratic Republic of Congo

³ Independent Researcher

⁴ Official University of Bukavu
Department of Biology
BP 570, Bukavu
Democratic Republic of Congo

⁵ University of Kinshasa
Department of Biology
BP 127, Kinshasa XI
Democratic Republic of Congo

⁶ Higher Institute of Rural Development
of Bukavu
Department of Environnement
and Sustainable Development
BP 2849, Bukavu
Democratic Republic of Congo

⁷ Ministry of Agriculture
National Seed Service (SENASA)
National Seed Laboratory
BP 904 KIN1, Kinshasa
Democratic Republic of Congo

⁸ National Institute of Crop Science
Department of Southern Area Crop Science
RDA, Miryang 50424
Republic of Korea

**Auteur correspondant /
Corresponding author:**
Jun-Won KANG – jwkang15@knu.ac.kr



Photo 1.
Alchornea cordifolia, one of medicinal plants used to treat the symptoms
of malaria in Democratic Republic of Congo.
Photo Konda *et al.* (2012).

Doi : 10.19182/bft2021.347.a31882 – Droit d’auteur © 2021, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 16 juin 2020 ;
date d’acceptation : 16 décembre 2020 ; date de publication : 25 février 2021.



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

Citer l'article / To cite the article

Rusaati B. I. W., Gendusa A. P., Joo S. H., Park J. W., Masumbuko N. C., Iragi K. G., Ngbolua K.-T.-N., Furaha M. A., Rolly N. K., Kang J. W., 2021. A systematic review of antimalarial medicinal plants in Democratic Republic of the Congo. Bois et Forêts des Tropiques, 347: 11-27. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2021.347.a31882>

RÉSUMÉ

Revue systématique des plantes médicinales antipaludiques utilisées en République démocratique du Congo

En République démocratique du Congo (RDC), le paludisme est transmis par un parasite appelé *Plasmodium falciparum*. Le paludisme représente un problème majeur de santé publique dans ce pays en provoquant la mort de dizaines de milliers de personnes chaque année, en milieu urbain et rural. Des médicaments antipaludiques sont couramment utilisés mais des cas avérés de résistance à ces médicaments représentent un obstacle important à la lutte contre le paludisme. Il est donc impératif d'identifier de nouvelles molécules bioactives pouvant s'y substituer. De nombreuses plantes médicinales ayant des propriétés diverses s'utilisent en RDC pour traiter différentes maladies, dont le paludisme. Le présent article propose une revue systématique des ressources végétales antipaludiques en RDC. Sur la base de 28 articles sur l'ethnomédecine publiés entre 2001 et 2019, 232 espèces végétales appartenant à 67 familles de végétaux et identifiées dans 13 provinces ont été répertoriées pour le traitement du paludisme. De nombreuses espèces appartiennent aux familles des Fabacées, Astéracées, Euphorbiacées, Rubiacées et Apocyanacées. Les espèces dont l'utilisation est citée pour plus de trois provinces comprennent *Cymbopogon citratus*, *Vernonia amygdalina*, *Rauvolfia vomitoria* et *Catharanthus roseus*. La plupart des espèces identifiées comme plantes antipaludiques sont des essences ligneuses, principalement des phanérophytes. D'autre part, les principaux ingrédients identifiés pour la préparation des remèdes sont les feuilles, utilisées en décoction le plus souvent administrée par voie orale.

Mots-clés : traitement antipaludique, ethnomédecine, plantes médicinales, étude systématique, République démocratique du Congo.

ABSTRACT

A systematic review of antimalarial medicinal plants in Democratic Republic of the Congo

In Democratic Republic of the Congo (DRC), malaria is caused by a parasite called *Plasmodium falciparum*. Malaria is one of the country's major public health issues and responsible for the death of tens of thousands of people every year in both rural and urban environments. Antimalarial drugs are commonly used but some recorded cases of drug resistance are a major obstacle to controlling the spread of malaria. It is therefore essential to identify new bioactive molecules as an alternative. Many medicinal plants with different properties have been used as treatments for a variety of diseases in the DRC, including malaria. This study provides a systematic review of antimalarial plant resources in the DRC. From 28 papers on ethnomedicine published between 2001 and 2019, a total of 232 plant species belonging to 67 different plant families and identified in 13 provinces was reported in the treatment of malaria. A large number of these plant species belong to the Fabaceae, Asteraceae, Euphorbiaceae, Rubiaceae, and Apocyanaceae families. Species cited in more than three provinces include *Cymbopogon citratus*, *Vernonia amygdalina*, *Rauvolfia vomitoria* and *Catharanthus roseus*. Most of the species identified as antimalarial plants were tree species, with phanerophytes predominating. In addition, leaves were identified as the main ingredients for preparing remedies, most commonly by decoction administered orally.

Keywords: antimalarial treatment, ethnomedicine, medicinal plants, systematic review, Democratic Republic of the Congo.

RESUMEN

Revisión sistemática de las plantas medicinales antipalúdicas de la República Democrática del Congo

En la República Democrática del Congo (RDC) el paludismo está causado por un parásito llamado *Plasmodium falciparum*. El paludismo es uno de los principales problemas de salud pública del país y es responsable de la muerte de decenas de miles de personas cada año, tanto en entornos rurales como urbanos. Habitualmente se utilizan fármacos antipalúdicos, aunque se registran casos de resistencia a los medicamentos, que son un obstáculo importante para controlar la propagación de la malaria. Por lo tanto, es esencial identificar nuevas moléculas bioactivas como alternativa. En la RDC se han utilizado muchas plantas medicinales con diferentes propiedades como tratamiento de diversas enfermedades, entre ellas la malaria. Este estudio realiza una revisión sistemática de los recursos vegetales antipalúdicos en la RDC. En 28 artículos sobre etnomedicina publicados entre 2001 y 2019, un total de 232 especies de plantas para el tratamiento de la malaria pertenecientes a 67 familias diferentes se identificaron en 13 provincias. Un gran número de estas especies vegetales pertenecen a las familias Fabaceae, Asteraceae, Euphorbiaceae, Rubiaceae y Apocyanaceae. Las especies citadas en más de tres provincias incluyen *Cymbopogon citratus*, *Vernonia amygdalina*, *Rauvolfia vomitoria* y *Catharanthus roseus*. La mayor parte de las plantas antipalúdicas identificadas son especies arbóreas, con predominio de las fanerófitas. Y las hojas son los principales ingredientes para la preparación de curas, mayoritariamente por decocción administrada por vía oral.

Palabras clave: tratamiento antipalúdico, etnomedicina, plantas medicinales, revisión sistemática, República Democrática del Congo.

Introduction

Malaria, a disease caused by the parasite *Plasmodium falciparum*, is one of the major public health problems in many tropical countries. This disease is spread by mosquitoes (Landis *et al.*, 2009; Messina *et al.*, 2011). According to the World Health Organization (WHO), about 228 million cases and more than 405 thousand deaths related to malaria have occurred in 2018 around the world, with the majority of deaths (93%) found in Africa (WHO, 2019).

In Democratic Republic of the Congo (DRC), reports indicated that, despite the efforts to prevent the spread of malaria, and alleviate its detrimental effects on the people's health nationwide (Swana *et al.*, 2018), other forms of challenges, such as drug resistance of the pathogen was identified as obstacle to control efficiently the spread of the disease in the sub-Saharan Africa (Alker *et al.*, 2008; Mobula *et al.*, 2009; Mvumbi *et al.*, 2015). To address this situation, there is a strong necessity to identify novel substances or bioactive molecules having the potential to overcome the drug resistance of the *Plasmodium falciparum*, eventually due to the recurrent use of similar molecules. Thus, medicinal plants could serve as an alternative to achieve this goal (Silva *et al.*, 2011; Ntie-Kang *et al.*, 2014), since they are relatively cost-effective and highly accessible (Madureira *et al.*, 2002; Muganga *et al.*, 2010).

The benefit of plants as bio-resources and their potentialities to treat different diseases has traditionally been highlighted by several research (Arshad *et al.*, 2014; Zarei *et al.*, 2017), and it is considered essential for human health care (Asadi-Samani *et al.*, 2013). The worldwide use and distribution of bio-resources enclose a large potential to unveil the undescribed aspects of medicinal plants, yet undiscovered (Balima *et al.*, 2018).

According to the WHO, around 80% of the population living in developing countries rely on traditional medicine for treating diseases (Kamatenesi-Mugisha and Oryem-Origa, 2005; Mahomoodally, 2013). Moreover, the extensive use of traditional medicines in Africa could be associated to the history and culture or customs, and economic environment (Mahomoodally, 2013). Medicinal plants still represent an important source of medical treatment in developing countries (Tabuti *et al.*, 2003).

The Congo Basin region itself is megadiverse in plant species, including medicinal plants (Light *et al.*, 2016). Screening studies for antimalarial medicinal plant species from Cameroon (Betti, 2002; Saotoing *et al.*, 2011; Titanji *et al.*, 2008; Kuete and Efferth, 2010; Betti *et al.*, 2013a), Gabon (Betti *et al.*, 2013b), the Central African Republic (Lakouéténé *et al.*, 2009), Republic of Congo (Mbatchi *et al.*, 2006; Nsonde-Ntandou *et al.*, 2005) and Guinea Equatorial (Gomez Marín and Merino Cristóbal, 1990) have demonstrated the potential of traditional medicinal plants as source of antimalarial substances. Furthermore, the DRC, with about half of the African humid forests, ranks fifth in the world for the diversity of plant species (UNESCO, 2010; Masunda *et al.*, 2019). It is estimated that the flora of the DRC comprises 377 families, 2,196 genera, and over



Photo 2.

Illustration of a variety of medicinal plants exposed in a local market in Kinshasa.
Photo K.-T.-N. Ngbolua *et al.* (2016).

11,000 species (Mbala, 2003). Many plants species in the DRC have been studied and described for their beneficial impact for treating various diseases in numerous scientific papers. Thus, the purpose of this study is to develop a systematic review of scientific papers on ethnomedicine, particularly on the treatment of malaria.

Methods

Sources of information

Through literature review and data mining, previous published papers related to the field of ethnobotany of medicinal plants in the DRC, were collected during December 2019, using available internet browsers.

The research was extended to the identification of references listed in retrieved articles. The major key words employed during the search, either in French or in English, were: “ethno-medicinal plants in DR of Congo” OR “ethnobotanical study in DR of Congo” OR “ethno pharmacology in DR of Congo” OR “phyto therapy in DR of Congo” OR “herbal treatments in DR of Congo” OR “anti-malaria plants in DR of Congo”. In addition to the published scientific papers on the subjects of interest, all information found to be necessary for the study were included as well, collected from scientific works, such as books, academic theses (Masters and doctorate thesis dissertations), while considering the year of publication, the methodology, or the study language.

Analysis

The following ethnomedicinal information were collected from the literature: (i) plant organs used: leaves, stem, stem bark, root, root bark, flowers, fruits, seeds or grain, whole plant, upper (aboveground) part, underground part;

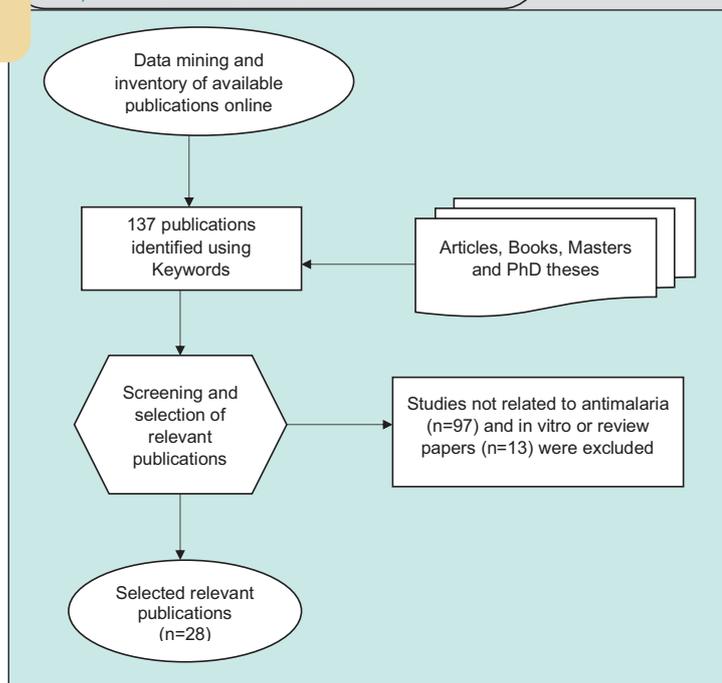


Figure 1.
Flowchart of the major steps for the selection of relevant publications.

(ii) mode of preparation: decoction, maceration, infusion, grinding, expression, extorsion, incineration, ash, etc.; (iii) way of administration: oral, enema, inhalation, bath, friction, chewing, tattoo, instillation; and (iv) the geographical location of the study. In the case of unavailability of data in one of the above groups, the corresponding field was marked “NR (not referenced)”.

The dataset was taxonomically standardized (synonym and misspelling) and updated following guidelines in the online websites: the plant list¹ or/and African plant database². The Angiosperm Phylogeny Group (APG III) was used to revise and update the family names (APG, 2009). The antimalarial plants species were characterized by morphology types: tree, shrub, sub-shrub, liana, herb. The life-form analysis focused on 223 species and was based on Raunkiaer’s system: Phanerophytes, Chamæphytes, Hemicryptophytes, Geophytes or Cryptophytes, Therophytes, Aerophytes and Epiphytes.

The conservation status of each anti-malaria species was determined by the IUCN red list of threatened species (IUCN, 2019) and includes: Not Evaluated (NE), Data Deficient (DD), Least concern (LC), Near threatened (NT), Vulnerable (VU), Endangered (EN), Critically endangered (CR), Extinct in the Wild (EW) and Extinct (EX).

1 <http://www.theplantlist.org>

2 <http://www.ville-ge.ch>

Results

Selected antimalarial related studies

In the perspective of using only studies providing useful data and information related to the use of medicinal plants as a treatment for malaria, an initial selection was performed. As a result, all studies with no relevant data on antimalarial plants were discarded, and only 41 full-text studies were evaluated in order to verify the evidence of the antimalarial plants. In addition, another 13 studies falling either into the category of review article or in vitro studies were excluded. Consequently, after the screening and selection process, 28 publications and academic reports (Masters and Doctorate Theses) were retained for further investigations (figure 1). Of this number, the earliest article was published in 2001 but about 92.9% of the publications were released between 2010-2019. Studies were conducted on 13 different provinces in the DRC as illustrated in figure 2. Moreover, the majority of plant species (185 species, 79.7%) was reported to be used in at least one province, and 27 species (11.6%) were listed in at least two provinces (table I). Meanwhile, 20 species (8.6%) were mentioned in more than two provinces. An illustration of the top 20 plant species widely distributed across the country (used in more than 2 provinces) is given in table II.

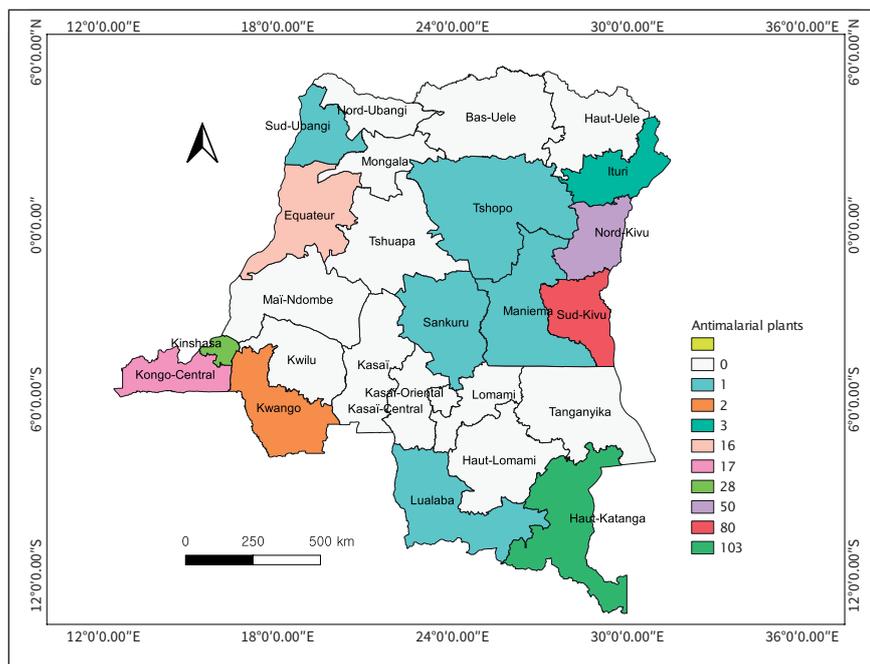


Figure 2.
Map of the spatial distribution of studies related to antimalaria treatment using plant species in the Democratic Republic of Congo. The highlighted zones on the map indicate the studies area related to antimalaria treatment using medicinal plants species. The color scheme in the legend shows the number of studies in each province.

Table I.
 Level of antimalarial plants richness within each province.

Provinces	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Species richness	103	80	50	28	17	16	3	2	1	1	1	1	1
Specific species in the province	82	48	17	19	9	7	1	0	1	0	1	0	0
Species shared by other provinces	21	32	33	9	8	9	2	2	0	1	0	1	1

Provinces: 1: Haut-Katanga, 2: Sud-Kivu, 3: Nord-Kivu, 4: Kinshasa, 5: Kongo-Central, 6: Equateur, 7: Ituri, 8: Kwango, 9: Tshopo, 10: Sud-Ubangi, 11: Lualaba, 12: Sankuru, 13: Maniema.

Table II.
 List of the most distributed antimalarial plants.

Species	Number of provinces	Provinces
<i>Senna occidentalis</i>	5	1,2,3,5,6
<i>Cymbopogon citratus</i>	5	1,2,3,4
<i>Vernonia amygdalina</i>	4	1,2,3
<i>Rauvolfia vomitoria</i>	4	1,3,4,6
<i>Catharanthus roseus</i>	4	1,2,3,5
<i>Carica papaya</i>	3	1,2,3
<i>Bidens pilosa</i>	3	1,2,3
<i>Alstonia boonei</i>	3	4,7,10
<i>Arachis hypogaea</i>	3	2,3,5
<i>Citrus limon</i>	3	1,2,3
<i>Erythrina abyssinica</i>	3	1,2,3
<i>Eucalyptus globulus</i>	3	1,2,3
<i>Harungana madagascariensis</i>	3	1,2,6
<i>Jatropha curcas</i>	3	1,5,8
<i>Lantana camara</i>	3	1,2,3
<i>Morinda morindoides</i>	3	4,5,6
<i>Persea americana</i>	3	2,3,6
<i>Physalis peruviana</i>	3	1,2,3
<i>Psidium guajava</i>	3	1,2,3
<i>Tithonia diversifolia</i>	3	1,2,3

Provinces: 1: Haut-Katanga, 2: Sud-Kivu, 3: Nord-Kivu, 4: Kinshasa, 5: Kongo-Central, 6: Equateur, 7: Ituri, 8: Kwango, 9: Tshopo, 10: Sud-Ubangi, 11: Lualaba, 12: Sankuru, 13: Maniema.

Diversity and morphology of antimalarial plants

A total of 232 species of medicinal plants, distributed in 181 genera, and belonging to 67 families were mentioned as being involved in the treatment of malaria in different parts of the DRC (figure 2; table III). Among these families, about

82% are dicots, and nearly 14% are monocots, and only 3% are gymnosperms and pteridophytes. The dicotyledonous group is represented by 55 families and 169 genera, while the monocotyledonous group is represented by 10 families and 10 genera. The investigation on the life-form of the antimalarial plants showed that Phanerophytes represent 68.3% of the species cited, followed by Therophytes (13.4%), Chamæphytes (12.9%), Geophytes (4.5%), and Hemycryptophytes (0.9%) (table III). Regarding the morphological type, figure 3 shows that woody plants (66.8%) were the dominant type (trees: 38.8%, shrubs: 16.8%, sub-shrub: 3.02%, and liana: 8.2%). About half of the reported antimalarial plant species across the country (48.3%) belong to the following families: Fabaceae (30 species), Asteraceae (27 species), Rubiaceae (15 species), Euphorbiaceae (14 species), Apocynceae (10 species), Annonaceae (8 species) and Meliaceae (8 species). Around 49.2% of the families contributed with only one species to the antimalarial plant species, while 145 genera are represented by a single antimalarial plant species. *Euphorbia* (Euphorbiaceae) and *Strychnos* (Loganiaceae) were represented by 4 plant species each. In addition to *Euphorbia* and *Strychnos*, *Acacia*, *Afromomum*, *Aloe*, *Chenopodium*, *Combretum*, *Dalbergia*, *Ficus*, *Landolphia*, *Morinda*, *Senna* and *Ziziphus* have 3 species each (appendix 1).

Parts used, mode of preparation, and route of administration

The utilization of plant parts and their mode of preparation is subjected to their accessibility and the knowledge of indigenous people (Umair *et al.*, 2019). The results of the analysis of the plant parts used show that the leaves were the most used parts of plant by traditional healers, which accounted for about 60% of the total parts of plants used, followed by roots (32.7%), and stems/bark (22.4%). A few plants were harvested for their fruits or seeds/grains (6.5%) or used whole (5.2%). In 3.4% of cases, the parts of the plant used were not referenced (figure 4).

Table III.
Summary of the antimalarial plants used in Democratic Republic of Congo.

	Pteridophytes	Gymnosperms	Angiosperms		Total
			Dicotyledons	Monocotyledons	
Family	1	1	55	10	67
Genus	1	1	169	10	181
Species	1	1	211	19	232
Phanerophyte	-	1	148	4	153
Chamaephyte	-	0	25	3	28
Hemycryptophyte	-	0	2	0	2
Therophyte	-	0	28	2	30
Geophyte	-	0	0	10	10

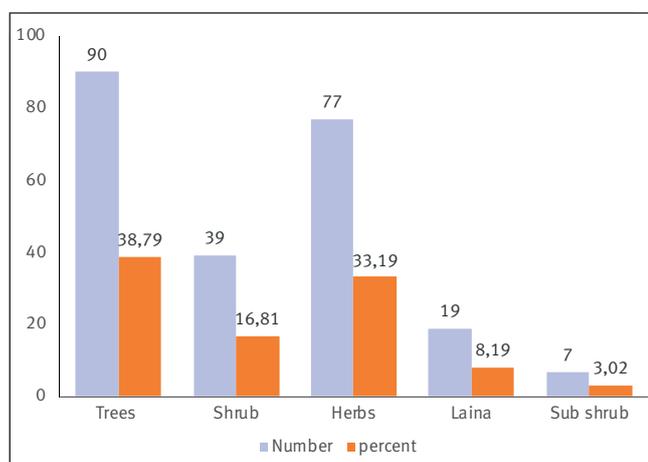


Figure 3.
Morphology of the most cited antimalarial plants species.

Sixteen methods were used to prepare plant materials. Among these, the majority used decoction (169 reported), followed by maceration (48), infusion (27), grinding and sap (4 each), powder (3) expression, extorsion, and spray (2 each); chewing, ash, incineration, milling, paste, pounding, and leaves roasted in palm oil (1 each); and 19 were not referenced (NR) (figure 5). The majority (156) of antimalarial remedies were taken orally, followed by enema/anal/suppository (12), bath, inhalation, and instillation (7 each). In rare instances, treatment was administered by rubbing leaves all over the body (2) and by tattoo (1). Sixty-five reports failed to indicate the mode of administration of the plant medicines.

Threat status

The unsustainable exploitation of plant species has resulted in a high vulnerability for certain species (Raj *et al.*, 2018). It was found that 49 plant species used as a remedy for treating malaria in the DRC were reported in the IUCN's Red List (table IV). According to the IUCN list, one species was

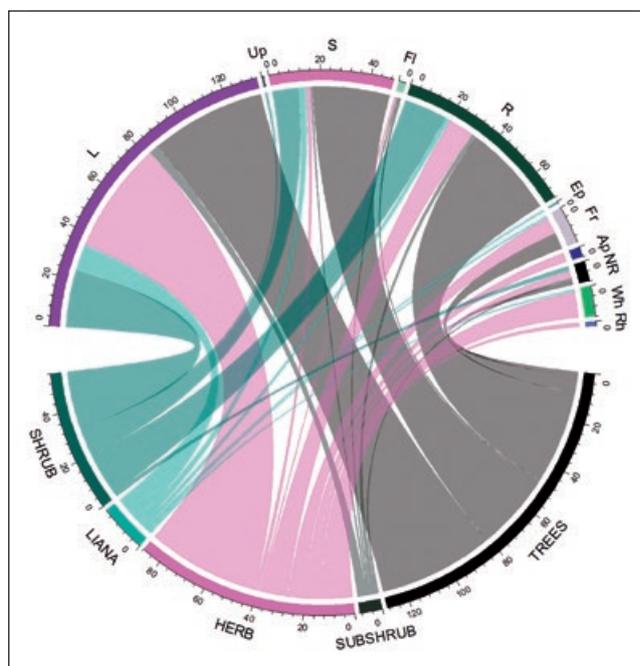


Figure 4.
Distribution of plant parts commonly used in ethnomedicine by morphological types. Eleven parts used (top half of circle) include (left to right): leaves (L), underground part (Up), stems (S), flower (FI), roots (R), external part (Ep), fruit, seed, grains (Fr), aerial part (Ap), not recorded (NR), whole plant (Wh), and rhizomes (Rh). Morphological types (bottom half of circle). Scale numbers around the circle indicate cited time.

classified as “data deficient”, 43 as “least concern”, three as “vulnerable”, one as “near threatened”, and one as “critically endangered”. The other species were not included yet in the list. The international trade in a few of the species studied is also banned by the CITES treaty³: *Aloe christianii*, *Aloe dawei*, *Dalbergia boehmii*, *Dalbergia chapelieri*, *Dalbergia nitidula*, *Euphorbia ingens*, *Euphorbia tirucalli*, and *Prunus africana*.

³ www.cites.org

Table IV.
 The conservation status of some medicinal plants used to treat malaria in the Democratic Republic of Congo.

Species	Status
<i>Austranella congolensis</i>	Critically endangered
<i>Dalbergia chapelieri</i>	Near threatened
<i>Lebrunia buchaie</i> , <i>Prunus africana</i> , <i>Pseudospondias microcarpa</i>	Vulnerable
<i>Annona senegalensis</i> , <i>Annickia chlorantha</i> , <i>Azadirachta indica</i> , <i>Bobgunnia madagascariensis</i> , <i>Cassia alata</i> , <i>Cassia sieberiana</i> , <i>Carapa procera</i> , <i>Combretum molle</i> , <i>Combretum zeyheri</i> , <i>Eucalyptus citriodora</i> , <i>Eucalyptus globulus</i> , <i>Euphorbia ingens</i> , <i>Euphorbia tirucalli</i> , <i>Erythrina abyssinica</i> , <i>Ficus exasperate</i> , <i>Ficus thonningii</i> , <i>Harungana madagascariensis</i> , <i>Hymenocardia acida</i> , <i>Isobertia angolensis</i> , <i>Isolona hexaloba</i> , <i>Julbernardia paniculata</i> , <i>Melia azedarach</i> , <i>Monodora laurentii</i> , <i>Monodora myristica</i> , <i>Ochna schweinfurthiana</i> , <i>Parinari curatellifolia</i> , <i>Parkia zenkeri</i> , <i>Pentaclethra macrophylla</i> , <i>Pericopsis angolensis</i> , <i>Persea americana</i> , <i>Piper capense</i> , <i>Pterocarpus angolensis</i> , <i>Pterocarpus tinctorius</i> , <i>Ranunculus multifidus</i> , <i>Raphia gentiliana</i> , <i>Rauwolfia caffra</i> , <i>Terminalia mollis</i> , <i>Thomandersia hensii</i> , <i>Spathodea campanulata</i> , <i>Syzygium guineense</i> , <i>Xylopia aethiopica</i> , <i>Ziziphus abyssinica</i> , <i>Ziziphus mucronata</i>	Least concern
<i>Mangifera indica</i>	Data deficient

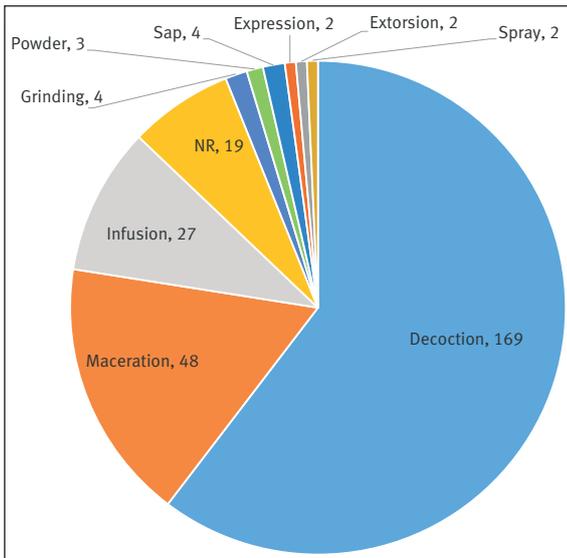


Figure 5.
 Preparation methods of the most cited antimalarial plants.

Table V.
 The number of species (Ndjele, 1988) and the number of antimalarial plants per family in the terrestrial flora of the Democratic Republic of Congo.

Families	Democratic Republic of Congo	Antimalarial plants	Rank
Fabaceae	893	30	1
Asteraceae	729	27	2
Rubiaceae	674	15	3
Euphorbiaceae	377	14	4
Apocynaceae	187	10	5
Annonaceae	119	8	6
Meliaceae	47	8	6
Lamiaceae	307	6	7
Myrtaceae	31	6	7
Solanaceae	96	6	7

Discussion

Two hundred thirty-two medicinal plants associated with the treatment of malaria in DRC that distributed across 181 genera and 67 families were identified. From these families, Fabaceae, Asteraceae, Euphorbiaceae, and Rubiaceae had the highest number of antimalarial plants species. These findings are similar to those obtained by Asase *et al.* (2010), Traore *et al.* (2013), and Taek *et al.* (2018) who reported that the Fabaceae had a high number of antimalarial plants species compared to other families. In a converse approach, Iyama and Idu (2015) indicated that Fabaceae counts the highest number of antimalarial plants in Southern Nigeria, followed by Asteraceae. The predominance of medicinal plants from Fabaceae, Asteraceae ad Rubia-

ceae is due to the highest number of species disseminated throughout the DRC (table V) (Bakwaye *et al.*, 2013).

Similar to observations from other countries (Adekunle, 2008; Tabuti, 2008; Kodi *et al.*, 2017), woody plants constituted the largest source of antimalarial medicinal plants. From an ecological perspective, the life-forms profile of the plant allows a better appreciation of ecological conditions in which they live (Kami Kanda *et al.*, 2019). The high percentage of phanerophytes in antimalarial plants could be due to permanence of those plants throughout year (Mamadou *et al.*, 2019). The predominance of woody species and phanerophytes shows a forest physiognomy (Kikufi *et al.*, 2017; Lassa *et al.*, 2019), while the therophytes correspond to the ruderal strategy (Kikufi and Lukoki, 2008; Masharabu *et al.*, 2010).

Although several plant parts were used in the Congo, leaves were the most commonly used in malaria treatment. This is similar to other studies from African countries that have demonstrated leaves to be the most frequently used plant part in plant remedies (Saotoing *et al.*, 2011; Adia *et al.*, 2014; Anywar *et al.*, 2016). This contrasts with the findings of Ngarivhume *et al.* (2015) in Zimbabwe where roots were the most commonly used plant part. The preference for the utilization of leaves is justified by their effortless to collect, to store, and to process, but also, their action in photosynthesis and their bioactive compounds (Kayani *et al.*, 2014; Bibi *et al.*, 2015; Vijayakumar *et al.*, 2015; Amjad *et al.*, 2017; Faruque *et al.*, 2019). Further, cutting leaves is less harmful to the plant development and growth (Alalwan *et al.*, 2019).

It was found in this study that the most commonly used mode of preparation of antimalarial plants was decoction. This affirmation corroborates the reports from the other African countries (Koudouvo *et al.*, 2011; Yetein *et al.*, 2013; Alebie *et al.*, 2017; Okello and Kang, 2019) and Asian countries (Bora *et al.*, 2007; Ong *et al.*, 2018). Decoction is largely used because of it is easy to prepare by mixing herbs with water, tea, or soup (Umair *et al.*, 2019).

The primary administration route is oral. These results are consistent with the observations reported by other countries (Bora *et al.*, 2007; Tor-anyin *et al.*, 2003; Idowu *et al.*, 2010).

Among the recorded plant species, some have already been studied *in vitro* by Congolese Scientists, however, the phytochemical study of many antimalarial plant species has not yet been documented *in vitro* and/or *in vivo*.

Conclusion

This systematic review of medicinal plants provides a comprehensive insight into the existing antimalarial plants species in the Democratic Republic of the Congo (DRC). The 28 ethnobotanical studies published in the last two decades used in the study, highlighted the diversity of commonly used plant species with pharmacological effects, and their spatial distribution across the DRC (cultures and provinces), and represent an alternative mean for malaria prevention and a remedy for its treatment in the DRC. In addition, plants remain the major therapeutic remedy for malaria. Nevertheless, there are likely more sources of traditional knowledge and articles not published online that may contain precious information in the Phyto pharmacopeia against malaria that could serve as a basis for future studies.

Acknowledgments

The authors are grateful to all of the scholars whose work contributed to this systematic review, and Rusaati B. I. also thanks the Korea Forestry Promotion Institute (KOFPI) for providing his PhD scholarship.

Appendix 1 – List of antimalarial plants

Plant family	Botanical name	Morphological type	Life form	Part used	Preparation mode	Used methods	Provinces	References
Acanthaceae	<i>Hygrophila auriculata</i> (Schumach.) Heine	H	Ch	AP	NR	NR	2	Karhagomba <i>et al.</i> (2013); Many <i>et al.</i> (2020)
Acanthaceae	<i>Hypoestes triflora</i> (Forssk.) Roem. & Schult.	H	Ch	WP	De	Oral	2	Many <i>et al.</i> (2020)
Acanthaceae	<i>Thomandersia hensii</i> De Wild. & T. Durand	Sh	Ph	L	De	Oral	4	Ngbolua <i>et al.</i> (2014)
Acanthaceae	<i>Justicia insularis</i> T. Anderson	H	Th	SB	De	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Amaranthaceae	<i>Chenopodium album</i> L.	H	Th	WP	De	Enema	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Amaranthaceae	<i>Chenopodium opulifolium</i> Schrad. ex W.D.J. Koch & Ziz	H	Th	L	De	Oral	2	Many <i>et al.</i> (2020)
Amaranthaceae	<i>Cyathula prostrata</i> (L.) Blume	H	Th	L	De	Oral, noise	6	Konda <i>et al.</i> (2012)
Amaranthaceae	<i>Dysphania ambrosioides</i> (L.) Mosyakin & Clemants	H	Th	L	De	Oral	2, 3	Kasali <i>et al.</i> (2014a); Kasali <i>et al.</i> (2014b); Many <i>et al.</i> (2020)
Amaryllidaceae	<i>Allium sativum</i> L.	H	Ge	Bulds	Pounding	NR	2, 3	Kasali <i>et al.</i> (2014a); Kasali <i>et al.</i> (2014b)
Amaryllidaceae	<i>Allium cepa</i> L.	H	Ge	WP	Inf	Enema	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Anacardiaceae	<i>Pseudospondias microcarpa</i> (A. Rich.) Engl.	T	Ph	L, B	De, Ma	Oral, anal	6	Konda <i>et al.</i> (2012)
Anacardiaceae	<i>Mangifera indica</i> L.	T	Ph	L, RB, SB	De, Ma	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Anisophylleaceae	<i>Anisophyllea pomifera</i> Engl. & Brehmer	T	Ph	L, R, SB	De, Ma	Oral, enema	1	Chiribagula <i>et al.</i> (2017); Kalonda <i>et al.</i> (2014); Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Annonaceae	<i>Monodora myristica</i> (Gaertn.) Dunal	T	Ph	Fr, Gr	NR	NR	4	Ngbolua <i>et al.</i> (2015)
Annonaceae	<i>Hexalobus monopetalus</i> (A. Rich.) Engl. & Diels	Sh	Ph	R	De	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019); Kalonda <i>et al.</i> (2014)
Annonaceae	<i>Annona senegalensis</i> Pers.	Sh	Ph	R, SB	NR	Oral	4	Ngbolua <i>et al.</i> (2015); Ngbolua <i>et al.</i> (2016)
Annonaceae	<i>Annickia chlorantha</i> (Oliv.) Setten & Mass	T	Ph	SB	De	Oral	4	Ngbolua <i>et al.</i> (2014)
Annonaceae	<i>Isolona hexaloba</i> (Pierre) Engl. & Diels	T	Ph	SB	De	Oral	4	Ngbolua <i>et al.</i> (2014)
Annonaceae	<i>Monodora laurentii</i> De Wild.	T	Ph	SB	De	Oral	4	Ngbolua <i>et al.</i> (2014)

Appendix 1 (continued)

Plant family	Botanical name	Morphological type	Life form	Part used	Preparation mode	Used methods	Provinces	References
Annonaceae	<i>Uvaria scabrida</i> Oliv.	L	Ph	SB	De	Oral	4	Ngbolua <i>et al.</i> (2014)
Annonaceae	<i>Xylopia aethiopica</i> (Dunal) A. Rich.	T	Ph	SB	De	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Apiaceae	<i>Centella asiatica</i> (L.) Urb.	H	Ch	L, R	Ma	NR	1	Kalonda <i>et al.</i> (2014)
Apiaceae	<i>Steganotaenia araliacea</i> Hochst.	T	Ph	L, R	De	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Apiaceae	<i>Agrocharis incognita</i> (C. Norman) Heywood and Jury	H	Th	NR	NR	NR	2	Karhagomba <i>et al.</i> (2013)
Apocynaceae	<i>Alstonia boonei</i> De Wild.	T	Ph	B	De	Oral	4, 7, 10	Terashima and Ichikawa (2003); Ngbolua <i>et al.</i> (2014); Mongeke <i>et al.</i> (2018)
Apocynaceae	<i>Mondia whitei</i> (Hook. f.) Skeels	L	Ph	B	NR	NR	4	Ngbolua <i>et al.</i> (2019)
Apocynaceae	<i>Landolphia kirkii</i> Dyer	L	Ph	L	De, Ma	Oral	1	Chiribagula <i>et al.</i> (2017)
Apocynaceae	<i>Landolphia parvifolia</i> K. Schum.	L	PH	L	De	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Apocynaceae	<i>Catharanthus roseus</i> (L.) G. Don	Ssh	Ph	L, R	De	Oral	1, 2, 3, 5	Kasali <i>et al.</i> (2014a); Ngbolua <i>et al.</i> (2013a); Kasali <i>et al.</i> (2014b); Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Apocynaceae	<i>Rauvolfia caffra</i> Sond	T	Ph	L, RB, SB	De	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Apocynaceae	<i>Rauvolfia vomitoria</i> Afzel.	Sh	Ph	L, RB, SB	De	Oral	1, 3, 4, 6	Kasali <i>et al.</i> (2014a); Makumbelo <i>et al.</i> (2008); Ilumbe Bayeli (2010); Kasika <i>et al.</i> (2015); Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Apocynaceae	<i>Landolphia congolensis</i> (Stapf) Pichon	L	Ph	L, S	De	NR	1	Kalonda <i>et al.</i> (2014)
Apocynaceae	<i>Diplorhynchus condylocarpon</i> (Müll. Arg.) Pichon	T	Ph	RB	De	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Apocynaceae	<i>Picralima nitida</i> (Stapf) T. Durand & H. Durand	T	Ph	Se	Chewing	Oral	4	Ngbolua <i>et al.</i> (2014)
Araceae	<i>Amorphophallus angolensis</i> N.E. Br.	H	Ge	Tubers	NR	Oral	2	Chifundera (2001)
Arecaceae	<i>Raphia sudanica</i> A. Chev.	Sh	Ph	L	De	Oral	5	Nzuki (2016)
Arecaceae	<i>Raphia gentiliana</i> De Wild.	T	Ph	NR	De	Oral	5	Nzuki (2016)
Aristolochiaceae	<i>Aristolochia hockii</i> De Wild.	H	Ch	RB	De	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Aristolochiaceae	<i>Aristolochia</i> sp.	H	Ph	Se	De	NR	3	Kasali <i>et al.</i> (2014a)
Asphodelaceae	<i>Aloe</i> sp.	H	Ge	AP	De	NR	2	Kasali <i>et al.</i> (2014b)
Asphodelaceae	<i>Aloe buettneri</i> A. Berger	H	Ge	L	sap	Friction	5	Nzuki (2016)
Asphodelaceae	<i>Aloe dawei</i> A. Berger	H	Ge	L	De	NR	3	Kasali <i>et al.</i> (2014a)
Asphodelaceae	<i>Aloe christianii</i> Reynolds	H	Ge	L, R	De	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Asteraceae	<i>Conyza sumatrensis</i> (S.F. Blake) Pruski & G. Sancho	H	Ch	L	De	Oral	3	Kasali <i>et al.</i> (2014a); Kasika <i>et al.</i> (2015)
Asteraceae	<i>Crassocephalum monthuosum</i> (S. Moore) Milme-Redh	H	Ch	L	De, Ma, Ash	Oral	2, 3	Kasali <i>et al.</i> (2014a); Many <i>et al.</i> (2020)
Asteraceae	<i>Mikania cordata</i> (Burm. f.) B.L. Rob.	L	Ch	L	De	NR	3	Kasali <i>et al.</i> (2014a)
Asteraceae	<i>Tithonia diversifolia</i> (Hemsl.) A. Cray.	Ssh	Ch	L, R	De, Ma	Oral, enema	1, 2, 3	Kasali <i>et al.</i> (2014a); Kasali <i>et al.</i> (2014b); Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Asteraceae	<i>Dichrocephala integrifolia</i> (L. f.) O. Ktze.	H	Hc	NR	NR	Hit a patient	3, 7	Kasika <i>et al.</i> (2015); Terashima and Ichikawa (2003)
Asteraceae	<i>Chamaemelum nobile</i> (L.) All.	H	Ph	Fl	Inf	NR	2	Kasali <i>et al.</i> (2014b)
Asteraceae	<i>Achillea millefolium</i> L.	H	Ph	L	De	NR	3	Kasali <i>et al.</i> (2014a)
Asteraceae	<i>Artemisia annua</i> L.	H	Ph	L	Inf	Oral	2, 3	Kasali <i>et al.</i> (2014a); Karhagomba <i>et al.</i> (2013); Kasali <i>et al.</i> (2014b); Many <i>et al.</i> (2020)
Asteraceae	<i>Baccharoides adoensis</i> (Sch. Bip. ex Walp.) H. Rob.	H	Ph	L	Ma	Enema, oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019); Muya <i>et al.</i> (2014)
Asteraceae	<i>Microglossa pyrifolia</i> (Lam.) Kuntze	T	Ph	L	De	NR	3	Kasali <i>et al.</i> (2014a)
Asteraceae	<i>Sambucus canadensis</i> L.	T	Ph	L	De	NR	3	Kasali <i>et al.</i> (2014a)
Asteraceae	<i>Mikania microptera</i> DC.	H	Ph	L	sap	Put in eyes	7	Terashima and Ichikawa (2003)
Asteraceae	<i>Matricaria chamomilla</i> L.	H	Ph	L, Fr	De, Inf	NR	2, 3	Kasali <i>et al.</i> (2014a); Kasali <i>et al.</i> (2014b)
Asteraceae	<i>Vernonia amygdalina</i> Del.	Sh	Ph	L, R	De, Inf	Oral	1, 2, 3, 5	Kasali <i>et al.</i> (2014a); Karhagomba <i>et al.</i> (2013); Ngbolua <i>et al.</i> (2013b); Kasali <i>et al.</i> (2014b); Ngbolua <i>et al.</i> (2014); Many <i>et al.</i> (2020); Kalonda <i>et al.</i> (2014)
Asteraceae	<i>Acanthospermum glabratum</i> (DC.) Wild	H	Th	L	De	Oral	2	Many <i>et al.</i> (2020)
Asteraceae	<i>Ageratum conyzoides</i> (L.) L.	H	Th	L	De	NR	2, 3	Kasali <i>et al.</i> (2014a); Kasali <i>et al.</i> (2014b)

Appendix 1 (continued)

Plant family	Botanical name	Morphological type	Life form	Part used	Preparation mode	Used methods	Provinces	References
Asteraceae	<i>Bidens pilosa</i> L.	H	Th	L	De	Oral	1, 2, 3	Kasali <i>et al.</i> (2014a); Kasika <i>et al.</i> (2015); Kasali <i>et al.</i> (2014b); Mbuyi <i>et al.</i> (2019); Many <i>et al.</i> (2020); Kalonda <i>et al.</i> (2014)
Asteraceae	<i>Cyanthillium cinereum</i> (L.) H. Rob.	H	Th	L	Ma	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Asteraceae	<i>Synedrella nodiflora</i> (L.) Gaertn.	H	Th	L	De	Oral	2	Many <i>et al.</i> (2020)
Asteraceae	<i>Artemisia</i> sp.	H	Th	WP	De	NR	5	Ngbolua <i>et al.</i> (2013a)
Asteraceae	<i>Aspilia kotschy</i> (Sch. Bip. ex Hochst.) Oliv.	H	Th	WP	De	Oral	2	Many <i>et al.</i> (2020)
Asteraceae	<i>Bidens oligoeflora</i> (Klatt) Wild	H	Th	WP	De	Oral	2	Many <i>et al.</i> (2020)
Asteraceae	<i>Crassocephalum picridifolium</i> (DC.) S. Moore	H	Th	WP	De	Oral	2	Many <i>et al.</i> (2020)
Asteraceae	<i>Polydora serratuloides</i> (DC.) H. Rob	H	Th	WP	De	Oral	2	Many <i>et al.</i> (2020)
Asteraceae	<i>Porphyrostemma chevalieri</i> (O. Hoffm.) Hutch. & Dalziel	H		L	De	Oral	2	Many <i>et al.</i> (2020)
Asteraceae	<i>Anisopappus chinensis</i> Hook & Arn.	H		WP	NR	NR	11	Lusakibanza (2012)
Bignoniaceae	<i>Spathodea campanulata</i> P. Beauv.	T	Ph	L	De, Inf	Oral	2	Many <i>et al.</i> (2020)
Bignoniaceae	<i>Newbouldia laevis</i> (P. Beauv.) Seem.	T	Ph	R	Ma	NR	4	Makumbelo <i>et al.</i> (2008)
Boraginaceae	<i>Cynoglossum lanceolatum</i> Forssk.	H	Th	L	De	NR	3	Kasali <i>et al.</i> (2014a)
Bromeliaceae	<i>Ananas cosmesus</i> (L.) Merr.	H	Ch	L, Fr	Exp, ext	NR	2, 3	Kasali <i>et al.</i> (2014a); Kasali <i>et al.</i> (2014b)
Caricaceae	<i>Carica papaya</i> L.	T	Ph	L, R, Fl	De, Inf, Ma	Oral	1, 2, 3	Kasali <i>et al.</i> (2014a); Kasika <i>et al.</i> (2015); Kasali <i>et al.</i> (2014b); Mbuyi <i>et al.</i> (2019); Many <i>et al.</i> (2020); Ilumbe Bayeli (2010); Muya <i>et al.</i> (2014); Kalonda <i>et al.</i> (2014)
Chrysobalanaceae	<i>Parinari curatellifolia</i> Planch. ex Benth.	T	Ph	R	De	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Clusiaceae	<i>Garcinia huillensis</i> Welw.	T	Ph	L, RB	De	Oral	2	Many <i>et al.</i> (2020)
Clusiaceae	<i>Lebrunia buchaie</i> Staner	T	Ph	NR	NR	NR	2	Mangambu <i>et al.</i> (2015b)
Clusiaceae	<i>Garcinia kola</i> Heckel	T	Ph	SB, Fr	De	Chewing, oral	4, 6	Ngbolua <i>et al.</i> (2015); Ngbolua <i>et al.</i> (2016); Ngbolua <i>et al.</i> (2019); Ilumbe Bayeli (2010)
Combretaceae	<i>Combretum haullevilleianum</i> De Wild.	Sh	Ph	L, S, SB	De	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Combretaceae	<i>Combretum zeyheri</i> Sond.	T	Ph	L, S, SB	De	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Combretaceae	<i>Combretum molle</i> R. Br. ex G. Don	T	Ph	L, SB	De	Oral	2	Many <i>et al.</i> (2020)
Combretaceae	<i>Terminalia mollis</i> M.A. Lawson	T	Ph	L, SB	De	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Commelinaceae	<i>Tradescantia zebrina</i> Bosse	H	Ch	L, Fr	De	NR	3	Kasali <i>et al.</i> (2014a)
Convolvulaceae	<i>Ipomoea indica</i> (Burm.) Merr.	H	Ch	WP	De	Oral	2	Many <i>et al.</i> (2020)
Crassulaceae	<i>Kalanchoe crenata</i> (Andrews) Haw.	H	Ch	L	De, Sap	Oral, instillation	2	Many <i>et al.</i> (2020)
Cucurbitaceae	<i>Oreosyce africana</i> Hook. f.	L	Ph	WP	De	Oral	2	Chifundera (2001)
Cucurbitaceae	<i>Momordica foetida</i> Schumach.	H	Th	L	ext	NR	2	Kasali <i>et al.</i> (2014b)
Cupressaceae	<i>Cupressus lusitanica</i> Mill.	T	Ph	L	De, Inf	NR	2, 3	Kasali <i>et al.</i> (2014a); Kasali <i>et al.</i> (2014b)
Ebenaceae	<i>Diospyros mespiliformis</i> Hochst. ex A. DC.	T	Ph	R	Ma	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Euphorbiaceae	<i>Acalypha brachiata</i> Krauss	Sh	Hc	L	De	Oral	1	Mbayo <i>et al.</i> (2016)
Euphorbiaceae	<i>Croton</i> sp.	T	Ph	B	De	NR	3	Kasali <i>et al.</i> (2014a)
Euphorbiaceae	<i>Acalypha homblei</i> De Wild.	H	Ph	L	De	Oral	2	Many <i>et al.</i> (2020)
Euphorbiaceae	<i>Alchornea cordifolia</i> (Schumach. & Thonn.) Müll. Arg.	Sh	Ph	L	De	Oral	6	Konda <i>et al.</i> (2012)
Euphorbiaceae	<i>Ricinus communis</i> L.	Sh	Ph	L	Ma	Bath	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Euphorbiaceae	<i>Antidesma venosum</i> E. Mey. ex Tul.	T	Ph	L, R, RB	De, Inf	Oral	1, 2	Mbuyi <i>et al.</i> (2019); Mbayo <i>et al.</i> (2016); Many <i>et al.</i> (2019); Kalonda <i>et al.</i> (2014)
Euphorbiaceae	<i>Maprounea africana</i> Müll. Arg.	T	Ph	L, RB	De	Oral	2	Many <i>et al.</i> (2020)
Euphorbiaceae	<i>Jatropha curcas</i> L.	Sh	Ph	L, SB	De	Rub the leaves on the body, oral	1, 5, 8	Ndombe <i>et al.</i> (2016); Mbuyi <i>et al.</i> (2019); Mbayo <i>et al.</i> (2016); Nzuki (2016)
Euphorbiaceae	<i>Phyllanthus muellerianus</i> (Kuntze) Exell.	Sh	Ph	L, SB	De, Ma, Gri	Oral, fomentation	1	Chiribagula <i>et al.</i> (2017); Mbuyi <i>et al.</i> (2019); Mbayo <i>et al.</i> (2016)
Euphorbiaceae	<i>Manihot esculenta</i> L.	Sh	Ph	NR	NR	NR	5	Nzuki (2016)
Euphorbiaceae	<i>Euphorbia ingens</i> E. Mey. ex Boiss.	T	Ph	R	Ma	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)

Appendix 1 (continued)

Plant family	Botanical name	Morphological type	Life form	Part used	Preparation mode	Used methods	Provinces	References
Euphorbiaceae	<i>Euphorbia tirucalli</i> L.	T	Ph	R	Ma	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019); Muya <i>et al.</i> (2014)
Euphorbiaceae	<i>Euphorbia hirta</i> L.	H	Th	R	Ma	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Euphorbiaceae	<i>Euphorbia parviflora</i> L.	H		AP	Ma (oil)	NR	2	Kasali <i>et al.</i> (2014b)
Fabaceae	<i>Indigofera arrecta</i> Hochst. ex A. Rich.	H	Ch	L	Inf	NR	2	Kasali <i>et al.</i> (2014b)
Fabaceae	<i>Hylodesmum repandum</i> (Vahl) H. Ohashi & R.R. Mill	Ssh	Ch	L, FL	De, Inf	Oral	2	Manya <i>et al.</i> (2020)
Fabaceae	<i>Dialium angolense</i> Oliv.	T	Ph	L	De	Oral	2	Manya <i>et al.</i> (2020)
Fabaceae	<i>Julbernardia paniculata</i> (Benth.) Troupin	T	Ph	L	De, Inf	Oral	2	Manya <i>et al.</i> (2020)
Fabaceae	<i>Parkia bicolor</i> A. Chev.	T	Ph	L	De	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Fabaceae	<i>Senna spectabilis</i> (DC.) H.S. Irwin & Barneby	H	Ph	L	De	NR	2	Kasali <i>et al.</i> (2014b)
Fabaceae	<i>Bobgunnia madagascariensis</i> (Desv.) J.H. Kirkbr. and Wiersema	T	Ph	L, R	De, Ma, Spray	Oral, bath	1	Chiribagula <i>et al.</i> (2017); Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Fabaceae	<i>Dalbergia nitidula</i> Baker	Sh	Ph	L, R	De	NR	1	Kalonda <i>et al.</i> (2014)
Fabaceae	<i>Bauhinia reticulata</i> DC.	T	Ph	L, R, SB	De, Ma	Oral	1, 4	Mbuyi <i>et al.</i> (2019); Ngbolua <i>et al.</i> (2014); Muya <i>et al.</i> (2014)
Fabaceae	<i>Pterocarpus angolensis</i> DC.	T	Ph	L, R, SB	De	Oral	1	Chiribagula <i>et al.</i> (2017)
Fabaceae	<i>Pterocarpus tinctorius</i> Welw.	T	Ph	L, R, SB	De	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Fabaceae	<i>Senna occidentalis</i> (L.) Link	Ssh	Ph	L, R, SB	De, Ma	Oral	1, 2, 3, 5, 6	Manya <i>et al.</i> (2020); Nzuki (2016); Konda <i>et al.</i> (2012); Kasali <i>et al.</i> (2014a); Kasali <i>et al.</i> (2014b); Chiribagula <i>et al.</i> (2017); Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Fabaceae	<i>Cajanus cajan</i> (L.) Mill sp.	Sh	Ph	L, R, SB, Gr	Milling and maceration	Oral, instillation	1	Chiribagula <i>et al.</i> (2017); Mbuyi <i>et al.</i> (2019); Muya <i>et al.</i> (2014)
Fabaceae	<i>Isoberlinia angolensis</i> (Welw. ex Benth.) Hoyle & Brenan	T	Ph	L, RB	De	Oral	2	Manya <i>et al.</i> (2020)
Fabaceae	<i>Acacia polyacantha</i> Willd.	T	Ph	L, RB, SB	De, Inf, Ma	Oral	1	Chiribagula <i>et al.</i> (2017); Mbuyi <i>et al.</i> (2019); Muya <i>et al.</i> (2014)
Fabaceae	<i>Cassia sieberiana</i> L.	T	Ph	L, SB	De	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Fabaceae	<i>Dalbergia boehmii</i> Taub.	T	Ph	L, SB	De, Ma	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019); Kalonda <i>et al.</i> (2014); Manya <i>et al.</i> (2020)
Fabaceae	<i>Acacia buchananii</i> Harms	T	Ph	R	De, Ma	Enema	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Fabaceae	<i>Acacia karoo</i> Hayne	Sh	Ph	R	De, Ma	Enema	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Fabaceae	<i>Amblygonocarpus andongensis</i> (Oliv.) Exell & Torre	T	Ph	R	De	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Fabaceae	<i>Entada abyssinica</i> A. Rich.	Sh	Ph	R	Spray	Instillation (ear, nose)	1	Chiribagula <i>et al.</i> (2017); Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Fabaceae	<i>Pericopsis angolensis</i> (Baker) Meeuwen	T	Ph	R	De, Ma	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Fabaceae	<i>Senna alata</i> (L.) Roxb.	T	Ph	R	De	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Fabaceae	<i>Erythrina abyssinica</i> DC.	T	Ph	R, B, Fr	De, Inf, Ma	Oral, enema	1, 2, 3	Kasali <i>et al.</i> (2014a); Kasali <i>et al.</i> (2014b); Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Fabaceae	<i>Albizia adianthifolia</i> (Schum.) W.F. Wight	T	Ph	RB	De	Oral, fumigation, bath	1	Chiribagula <i>et al.</i> (2017); Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Fabaceae	<i>Pentaclethra macrophylla</i> Benth.	T	Ph	RB	De	Oral	4	Ngbolua <i>et al.</i> (2014)
Fabaceae	<i>Bauhinia thonningii</i> Schum.	T	Ph	RB, SB	De, Ma	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019); Muya <i>et al.</i> (2014)
Fabaceae	<i>Dalbergia chapelieri</i> Baill.	Sh	Ph	S	Inf	Oral	2	Manya <i>et al.</i> (2020)
Fabaceae	<i>Arachis hypogaea</i> L.	H	Th	Se	Paste	NR	2, 3, 5	Kasali <i>et al.</i> (2014a); Kasali <i>et al.</i> (2014b); Nzuki (2016)
Fabaceae	<i>Droogmansia giorgii</i> De Wild.	Ssh		L, R, SB	De	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Fabaceae	<i>Baphia capparidifolia</i> Baker	L		L, SB	De	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Fabaceae	<i>Rhynchosia insignis</i> (O. Hoffm.) R.E. Fr.	H		R	Ma	Oral	1	Muya <i>et al.</i> (2014)
Hypericaceae	<i>Psorospermum corymbiferum</i> Hochr.	Sh	Ph	L	Inf	Oral	2	Manya <i>et al.</i> (2020)
Hypericaceae	<i>Harungana madagascariensis</i> Lam. ex Poir.	T	Ph	L, R, SB	De	Oral	1, 2, 6	Kasali <i>et al.</i> (2014b); Muya <i>et al.</i> (2014); Konda <i>et al.</i> (2012); Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Icacinaceae	<i>Pyrenacantha staudtii</i> (Engl.) Engl.	L	Ph	L	De	Oral	6	Ilumbe Bayeli (2010)
Lamiaceae	<i>Kalaharia uncinata</i> (Schinz) Moldenke	Sh	Ch	L	De	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Lamiaceae	<i>Ocimum gratissimum</i> L.	Ssh	Ch	L	De, Inf, Ma, Gri	Poultice, oral, enema, bath	1	Chiribagula <i>et al.</i> (2017); Manya <i>et al.</i> (2020)
Lamiaceae	<i>Tetradenia riparia</i> (Hochst.) Codd	T	Ph	L	Exp	NR	2, 3	Kasali <i>et al.</i> (2014a); Kasali <i>et al.</i> (2014b)

Appendix 1 (continued)

Plant family	Botanical name	Morphological type	Life form	Part used	Preparation mode	Used methods	Provinces	References
Lamiaceae	<i>Vitex madiensis</i> Oliv.	Sh	Ph	L	De	Oral, spray on the body	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019); Kalonda <i>et al.</i> (2014)
Lamiaceae	<i>Mentha piperita</i> L.	H	Th	L	De	NR	2, 3	Kasali <i>et al.</i> (2014a); Kasali <i>et al.</i> (2014b)
Lamiaceae	<i>Ocimum americanum</i> L.	H	Th	L, RB	Gri	Rub the leaves all over the body	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Lamiaceae	<i>Leucas martinicensis</i> (Jacq.) R. Br.	H	Th	L, S	De	NR	3	Kasali <i>et al.</i> (2014a)
Lamiaceae	<i>Plectranthus barbatus</i> var. <i>grandis</i> (L.H. Cramer) Lukhoba & A.J. Paton	H		L, R	De	Oral, suppository	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019); Muya <i>et al.</i> (2014)
Lauraceae	<i>Persea americana</i> Mill.	T	Ph	L, Fr	De	Oral	2, 3, 6	Kasali <i>et al.</i> (2014a); Kasali <i>et al.</i> (2014b); Ilumbe Bayeli (2010)
Loganiaceae	<i>Strychnos cocculoides</i> Baker	Sh	Ph	RB	De	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019); Kalonda <i>et al.</i> (2014)
Loganiaceae	<i>Strychnos icaia</i> Baill.	L	Ph	RB	NR	NR	6	Lusakibanza Manzo (2012)
Loganiaceae	<i>Strychnos potatorum</i> L. f.	T	Ph	RB	De, powder	Oral, instillation (eyes, noise)	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Loganiaceae	<i>Strychnos spinosa</i> Lam.	T	Ph	RB	De, powder	Oral, instillation (eyes, noise)	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Lycopodiaceae	<i>Lycopodium clavatum</i> L.	H		NR	NR	NR	2	Mangambu <i>et al.</i> (2012)
Malvaceae	<i>Sida acuta</i> Burm. f.	Ssh	Ch	NR	NR	NR	3	Kasika <i>et al.</i> (2015)
Melastomataceae	<i>Memecylon flavovirens</i> Baker	Sh	Ph	L, R	Ma	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Meliaceae	<i>Ekebergia benguelensis</i> Welw. ex C. DC.	T	Ph	L	De	NR	1	Kalonda <i>et al.</i> (2014)
Meliaceae	<i>Melia azedarach</i> L.	T	Ph	L	NR	NR	2, 13	Karhagomba <i>et al.</i> (2013); Kasali <i>et al.</i> (2014b); Lusakibanza (2012)
Meliaceae	<i>Azadirachta indica</i> A. Juss.	T	Ph	L, RB, SB	De, Ma	Oral	1, 3	Kasali <i>et al.</i> (2014a); Chiribagula <i>et al.</i> (2017); Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Meliaceae	<i>Entandrophragma palustre</i> Staner	T	Ph	SB	De	Oral	4, 12	Ngbolua <i>et al.</i> (2014); Lusakibanza (2012)
Meliaceae	<i>Khaya nyasica</i> Stapf ex Baker f.	T	Ph	SB	De	Oral	1, 3	Kasika <i>et al.</i> (2015); Mbuyi <i>et al.</i> (2019); Muya <i>et al.</i> (2014)
Meliaceae	<i>Carapa procera</i> DC.	T	Ph	SB, Se	De	Chewing, oral	6	Ilumbe Bayeli (2010)
Menispermaceae	<i>Cissampelos owariensis</i> P. Beauv. ex DC.	L	Ph	EP	De	NR	1	Kalonda <i>et al.</i> (2014)
Menispermaceae	<i>Triclisia dictyophylla</i> Diels	L	Ph	L	De	Oral	4	Ngbolua <i>et al.</i> (2014)
Menispermaceae	<i>Stephania abyssinica</i> (Quart. -Dill. & A. Rich.) Walp.	L	Ph	L, R, SB	De	Enema	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Menispermaceae	<i>Penianthus longifolius</i> Miers	Sh	Ph	RB	De	Oral	4	Ngbolua <i>et al.</i> (2014)
Moraceae	<i>Ficus exasperata</i> Vahl	T	Ph	L	Ma	Oral	2	Manya <i>et al.</i> (2020)
Moraceae	<i>Ficus thonningii</i> Blume	T	Ph	L, RB	De	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Moraceae	<i>Ficus sur</i> Forssk.	Sh	Ph	L, RB, SB	De	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Musaceae	<i>Musa x paradisiaca</i> L.	H	Ph	L	Leaves roasted in palm oil	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Myristicaceae	<i>Pycnanthus marchalianus</i> Ghesq.	T	Ph	SB	De	Oral	6	Ilumbe Bayeli (2010)
Myrtaceae	<i>Callistemon speciosus</i> (Sims) Sweet	T	Ph	L	De	NR	3	Kasali <i>et al.</i> (2014a)
Myrtaceae	<i>Corymbia citriodora</i> (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson	T	Ph	L	De	Oral, inhalation	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Myrtaceae	<i>Eucalyptus globulus</i> Labill.	T	Ph	L	De	Inhalation, oral	1, 2, 3	Kasali <i>et al.</i> (2014a); Kasali <i>et al.</i> (2014b); Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Myrtaceae	<i>Psidium guajava</i> L.	T	Ph	L	De	Oral	1, 2, 3	Kasali <i>et al.</i> (2014a); Kasali <i>et al.</i> (2014b); Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Myrtaceae	<i>Syzygium guineense</i> (Willd.) DC.	T	Ph	L, RB, SB	De	Oral	1, 3	Kasali <i>et al.</i> (2014a); Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Myrtaceae	<i>Eucalyptus</i> sp.	T	Ph	S	Inf	NR	3	Kasali <i>et al.</i> (2014a)
Nyctaginaceae	<i>Mirabilis jalapa</i> L.	Sh	Ch	L	De	NR	2	Kasali <i>et al.</i> (2014b)
Ochnaceae	<i>Ochna schweinfurthiana</i> F. Hoffm.	Sh	Ph	L, R	De, Ma	Oral	1, 2	Mbuyi <i>et al.</i> (2019); Manya <i>et al.</i> (2020)
Oleaceae	<i>Schrebera trichoclada</i> Welw.	Sh	Ph	L, S	De, Ma	NR	1	Kalonda <i>et al.</i> (2014)
Passifloraceae	<i>Passiflora edulis</i> Sims	L	Ch	L	De	NR	3	Kasali <i>et al.</i> (2014a)
Passifloraceae	<i>Passiflora foetida</i> L.	H	Th	L	Inf	NR	2	Kasali <i>et al.</i> (2014b)
Pentadiplandraceae	<i>Pentadiplandra brazzeana</i> Baill.	Sh	Ph	R, S	De	Oral	6, 8	Ilumbe Bayeli (2010); Ndombe <i>et al.</i> (2016)

Appendix 1 (continued)

Plant family	Botanical name	Morphological type	Life form	Part used	Preparation mode	Used methods	Provinces	References
Phyllanthaceae	<i>Hymenocardia acida</i> Tul.	Sh	Ph	L	De	Oral, inhalation, bath	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Phytolaccaceae	<i>Phytolacca dodecandra</i> L'Hérit.	Sh gr	Ch	R	De	NR	2	Kasali <i>et al.</i> (2014b)
Picrodendraceae	<i>Oldfieldia dactylophylla</i> (Welw. ex Oliv.) J. Léonard	T	Ph	RB, SB	De	Oral, bath	1	Mbayo <i>et al.</i> (2016)
Piperaceae	<i>Piper guineense</i> Schum. and Thonn.	L	Ph	L, Se	De	Oral	2, 6	Kasali <i>et al.</i> (2014b); Ilumbe Bayeli (2010)
Piperaceae	<i>Piper nigrum</i> L.	L	Th	L	NR	NR	4	Ngbolua <i>et al.</i> (2015)
Piperaceae	<i>Piper capense</i> L. f.	Sh	Th	NR	NR	NR	2, 3	Karhagomba <i>et al.</i> (2013); Kasika <i>et al.</i> (2015)
Plantaginaceae	<i>Plantago palmata</i> Hook. f.	H	Ph	L	De	Oral	2	Kasali <i>et al.</i> (2014b); Manya <i>et al.</i> (2020)
Poaceae	<i>Cymbopogon densiflorus</i> (Steud.) Stapf	H	Ch	AP	De, Inf, Ma	Inhalation, oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019); Muya <i>et al.</i> (2014)
Poaceae	<i>Cymbopogon citratus</i> (DC.) Stapf	H	Th	L	De, Inf	Oral, inhalation, friction	1, 2, 3, 4, 5	Ngbolua <i>et al.</i> (2016); Ngbolua <i>et al.</i> (2019); Mbuyi <i>et al.</i> (2019); Kasali <i>et al.</i> (2014); Kasali <i>et al.</i> (2014b); Nzuki (2016)
Polygalaceae	<i>Securidaca longipedunculata</i> Fresen.	T	Ph	L, SB	De	Inhalation, oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019); Muya <i>et al.</i> (2014)
Proteaceae	<i>Faurea rochetiana</i> (A. Rich.) Chiov. ex Pic. Serm.	T	Ph	SB	De, Ma	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Ranunculaceae	<i>Ranunculus multifidus</i> Forssk.	H	Ph	L	De	NR	3	Kasali <i>et al.</i> (2014a)
Rhamnaceae	<i>Ziziphus abyssinica</i> Hochst. ex A. Rich.	Sh	Ph	R	Ma	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Rhamnaceae	<i>Ziziphus mucronata</i> Willd.	T	Ph	R	Ma	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Rhamnaceae	<i>Zizyphus resinosa</i> Hochst. ex A. Rich.	T	Ph	R	De, Ma	Oral	1	Chiribagula <i>et al.</i> (2017)
Rosaceae	<i>Prunus africana</i> (Hook. f.) Kalkman	T	Ph	B	NR	NR	2	Mangambu <i>et al.</i> (2015a)
Rosaceae	<i>Rubus rigidus</i> Sm.	L	Ph	L	De	NR	3	Kasali <i>et al.</i> (2014a)
Rubiaceae	<i>Fadogiella stigmatoloba</i> (K. Schum.) Robyns	H	Ch	L	De	Oral	2	Manya <i>et al.</i> (2020)
Rubiaceae	<i>Otiophora pauciflora</i> Baker	H	Ch	L	Ma	Oral	2	Chifundera (2001)
Rubiaceae	<i>Spermacoce princeae</i> (K. Schum.) Verdc.	H	Ch	L	De, Sap	Instillation	2	Manya <i>et al.</i> (2020)
Rubiaceae	<i>Cinchona calisaya</i> Wedd.	T	Ph	B	De	NR	2, 3	Kasali <i>et al.</i> (2014a); Kasali <i>et al.</i> (2014b)
Rubiaceae	<i>Leptactina benguelensis</i> (Welw. ex Benth & Hook. f.) R.D. Good.	T	Ph	L	De	Oral	4	Ngbolua <i>et al.</i> (2014)
Rubiaceae	<i>Morinda longiflora</i> G. Don	climbing shrub	Ph	L	De	NR	4	Makumbelo <i>et al.</i> (2008)
Rubiaceae	<i>Morinda morindoides</i> (Baker) Milne-Redh.	L	Ph	L	De	Oral, chewing	4, 5, 6	Ngbolua <i>et al.</i> (2013b); Ngbolua <i>et al.</i> (2016); Ngbolua <i>et al.</i> (2019); Ngbolua <i>et al.</i> (2014); Ilumbe Bayeli (2010)
Rubiaceae	<i>Rothmannia engleriana</i> (K. Schum.) Kea	T	Ph	L, RB	De, Ma	Oral	2	Manya <i>et al.</i> (2020)
Rubiaceae	<i>Cinchona officinalis</i> L.	T	Ph	L, SB	De	Oral	2	Manya <i>et al.</i> (2020)
Rubiaceae	<i>Morinda lucida</i> Benth.	Sh	Ph	L, UP	De	Oral, friction	4, 5	Ngbolua <i>et al.</i> (2019); Nzuki (2016)
Rubiaceae	<i>Gardenia ternifolia</i> Schumach. & Thonn.	Sh	Ph	R	De	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Rubiaceae	<i>Hymenodictyon floribundum</i> (Hoscht. & Steud) B.L. Rob.	Sh	Ph	R	De	NR	1	Kalonda <i>et al.</i> (2014)
Rubiaceae	<i>Sarcocephalus latifolius</i> (Sm.) E.A. Bruce	Sh	Ph	R	De	NR	5	Ngbolua <i>et al.</i> (2013a)
Rubiaceae	<i>Crossopteryx febrifuga</i> (Afzel. ex G. Don) Benth.	T	Ph	SB	De	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019); Kalonda <i>et al.</i> (2014)
Rubiaceae	<i>Nauclea diderrichii</i> (De Wild.) Merr.	Sh	Ph	SB	De	Oral	4	Ngbolua <i>et al.</i> (2014)
Rutaceae	<i>Citrus aurantium</i> L.	T	Ph	Fr	Ma	NR	2	Kasali <i>et al.</i> (2014b)
Rutaceae	<i>Citrus limon</i> (L.) Osbeck	T	Ph	L	De	Oral	1, 2, 3	Kasali <i>et al.</i> (2014a); Kasali <i>et al.</i> (2014b); Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Rutaceae	<i>Citrus medica</i> L.	T	Ph	L	Inf	Bath	9	Mbula <i>et al.</i> (2015)
Sapindaceae	<i>Zanha africana</i> (Radlk.) Exell	T	Ph	RB	Inc	Tattoo	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Sapotaceae	<i>Autranella congolensis</i> (De Wild.) A. Chev.	T	Ph	SB	De	Oral	4	Ngbolua <i>et al.</i> (2014)

Appendix 1 (continued)

Plant family	Botanical name	Morphological type	Life form	Part used	Preparation mode	Used methods	Provinces	References
Simaroubaceae	<i>Quassia Africana</i> (Baill.) Baill.	T	Ph	L, R	NR	Oral	4	Ngbolua <i>et al.</i> (2015); Ngbolua <i>et al.</i> (2016)
Solanaceae	<i>Solanum sisymbriifolium</i> Lam.	H	Ch	Fr	Inf	Oral/reactally applied	2	Chifundera (2001)
Solanaceae	<i>Capsicum annuum</i> L.	T	Ch	L	Ma, Inf	NR	1	Kalonda <i>et al.</i> (2014)
Solanaceae	<i>Solanum incanum</i> L.	H	Ch	R	De, Ma	Enema	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Solanaceae	<i>Nicotiana tabacum</i> L.	H	Th	L	Gri	Noise	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Solanaceae	<i>Physalis peruviana</i> L.	H	Th	L, R	De, Inf	Oral	1, 2, 3	Kasali <i>et al.</i> (2014a); Kasali <i>et al.</i> (2014b); Mbuyi <i>et al.</i> (2019); Manya <i>et al.</i> (2020)
Solanaceae	<i>Physalis angulata</i> L.	H	Th	WP	NR	NR	5	Lusakibanza Manzo (2012)
Tropaeolaceae	<i>Tropaeolum majus</i> L.	H	Ch	L	De	NR	2, 3	Kasali <i>et al.</i> (2014a); Kasali <i>et al.</i> (2014b)
Verbenaceae	<i>Lantana camara</i> L.	Sh	Ph	L	De, Inf	Inhalation, oral	1, 2, 3	Kasali <i>et al.</i> (2014a); Kasali <i>et al.</i> (2014b); Mbuyi <i>et al.</i> (2019); Manya <i>et al.</i> (2020)
Verbenaceae	<i>Lippia multiflora</i> Moldenke	H		L	De	Oral	5	Nzuki (2016)
Zingiberaceae	<i>Curcuma longa</i> L.	H	Ge	L	Ma	Oral	5	Nzuki (2016)
Zingiberaceae	<i>Aframomum melegueta</i> K. Schum.	H	Ge	L, R	De	Oral	1	Mbuyi <i>et al.</i> (2019)
Zingiberaceae	<i>Aframomum albobviolaceum</i> (Ridl.) K. Schum.	H	Ge	L, R, Fr	Ma	Oral	4, 6	Ngbolua <i>et al.</i> (2016); Ngbolua <i>et al.</i> (2019); Illumbe Bayeli (2010)
Zingiberaceae	<i>Aframomum laurentii</i> (De Wild. & T. Durand) K. Schum.	H	Ph	L	De, Inf, powder	Oral, topical application	2	Manya <i>et al.</i> (2020)

Morphological type (H: herb, T: tree, Sh: shrub, Ssh: sub-shrub, L: liana), life-form (Ph: Phanerophyte, Ch: Chamaephyte, Hc: Hemicryphophyte, Th: Therophyte, Ge: Geophyte), part used (L: leaves, R: root, RB: root bark, WP: whole plant, Fr: fruit, AP: arial part, B: bark, Gr: grain, Se: seed, Fl: flower, S: stem, SB: stem bark, UP: underground part, EP: external part), preparation mode (De: decoction, Ma: maceration, Inf: infusion, Gri: grinding, Exp: expression, Ext: extorsion, Inc: incineration), Provinces (1: Haut-Katanga, 2: Sud-Kivu, 3: Nord-Kivu, 4: Kinshasa, 5: Kongo-Central, 6: Equateur, 7: Ituri, 8: Kwango, 9: Tshopo, 10: Sud-Ubangi, 11: Lualaba, 12: Sankuru, 13: Maniema).

References

- Adekunle M. F., 2008. Indigenous uses of plant leaves to treat malaria fever at Omo forest reserve (OFR) Ogun State, Nigeria. *Ethiopian Journal of Environmental Studies and Management*, 1 (1): 31-35. <https://doi.org/10.4314/ejesm.v1i1.41567>
- Adia M. M., Anywar G., Byamukama R., Mugisha M. K., Sekagya Y., Kaku-didi E K., *et al.*, 2014. Medicinal plants used in malaria treatment by Prometra herbalists in Uganda. *Journal of Ethnopharmacology*, 155: 580-588. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2014.05.060>
- Alalwan T. A., Alkhuzai J. A., Jameel Z., Mandeel Q. A., 2019. Quantitative ethnobotanical study of some medicinal plants used by herbalists in Bahrain. *Journal of Herbal Medicine*, 17-18: 100278. <https://doi.org/10.1016/j.hermed.2019.100278>
- Alebie G., Urga B., Worku A., 2017. Systematic review on traditional medicinal plants used for the treatment of malaria in Ethiopia: trends and perspectives. *Malaria Journal*, 16: 307. <https://doi.org/10.1186/s12936-017-1953-2>
- Alker A. P., Kazadi W. M., Kutelemani A. K., Bloland P. B., Tshefu A. K., Meshnick S. R., 2008. Dhfr and dhps genotype and sulfadoxine-pyrimethamine treatment failure in children with falciparum malaria in the Democratic Republic of Congo. *Tropical Medicine and International Health*, 13 (11): 1384-1391. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3156.2008.02150.x>
- Amjad M. S., Qaeem M. F., Ahmad I., Khan S. U., Chaudhari S. K., Zhaid M. N., *et al.*, 2017. Descriptive study of plant resources in the context of the ethnomedicinal relevance of indigenous flora: A case study from Toli Peer National Park, Azad Jammu and Kashmir, Pakistan. *PLoS ONE*, 12 (2): e0171896. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171896>
- Anywar G., Van't Klooster C. E. I. A., Byamukama R., Willcox M., Nalumsansi P. A., De Jong J., *et al.*, 2016. Medicinal plants used in the treatment and prevention of malaria in Cegere Sub-County, Northern Uganda. *Ethnobotany Research and Applications*, 14: 505-516. <http://dx.doi.org/10.17348/era.14.0.505-516>
- APG, 2009. An update of the Angiosperm phylogeny group classification for the orders and families of flowering plants: APGIII. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 161: 105-121. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.2009.00996.x>
- Arshad M., Ahmad M., Ahmed E., Saboor A., Abbas A., Sadiq S., 2014. An ethnobiological study in Kala Chitta hills of Pothwar region, Pakistan: multinomial logit specification. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 10: 13. <http://www.ethnobiomed.com/content/10/1/13>
- Asadi-Samani M., Rafeian-Kopaei M., Azimi N., 2013. Gundelia: A systematic review of medicinal and molecular perspective. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 16 (21): 1238-1247. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2013.1238.1247>
- Asase A., Akwetey G. A., Achel D. G., 2010. Ethnopharmacological use of herbal remedies for the treatment of malaria in the Dagme West District of Ghana. *Journal of Ethnopharmacology*, 129: 367-376. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2010.04.001>
- Bakwaye F. N., Termote C., Kimbundu K., Van Damme P., 2013. Identification et importance locale des plantes médicinales utilisées dans la région de Mbanza-Ngungu, République démocratique du Congo. *Bois et Forêts des Tropiques*, 316 (2) : 63-77. <https://doi.org/10.19182/bft2013.316.a20531>
- Balima L. H., Nacoulma B. M. I., Ekué M. R. M., Kouamé F. N., Thiombiano A., 2018. Use patterns, use values and management of *Azalia africana* Sm. in Burkina Faso: implications for species domestication and sustainable conservation. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 14: 23. <https://doi.org/10.1186/s13002-018-0221-z>

- Betti J. L., Caspa R., Ambara J., Kourogue R. L., 2013a. Ethno-botanical study of plants used for treating malaria in a forest: savanna margin area, East region, Cameroon. *Global Journal of Research on Medicinal Plants and Indigenous Medicine*, 2 (10): 692-708. <http://www.ethnopharmacologia.org/prelude2020/pdf/biblio-hb-56-betti.pdf>
- Betti J. L., Iponga D. M., Yongo O. D., Mbomio D. O., Yobo C. M., Ngoy A., 2013b. Ethnobotanical study of medicinal plants of the Ipassa-Makokou Biosphere, Gabon: Plants used for treating malaria. *Journal of Medicinal Plants Research*, 7 (31): 2300-2318. <https://doi.org/10.5897/JMPR12.1211>
- Betti J. L., 2002. Medicinal plants sold in Yaoundé markets, Cameroon. *African Study Monographs*, 23 (2): 47-64. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.574.8891&rep=rep1&type=pdf>
- Bibi T., Ahmad M., Tareen N. M., Jabeen R., Sultana S., Zafar M., et al., 2015. The endemic medicinal plants of Northern Balochistan, Pakistan and their uses in traditional medicine. *Journal of Ethnopharmacology*, 173: 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2015.06.050>
- Bora U., Sahu A., Saikia A. P., Ryakala V. K., Goswami P., 2007. Medicinal plants used by the people of Northeast India for curing malaria. *Phytotherapy Research*, 21: 800-804. <https://doi.org/10.1002/ptr.2178>
- Chifundera K., 2001. Contribution to the inventory of medicinal plants from the Bushi area, South Kivu Province, Democratic Republic of Congo. *Fitoterapia*, 72: 351-386. [https://doi.org/10.1016/s0367-326x\(00\)00294-x](https://doi.org/10.1016/s0367-326x(00)00294-x)
- Chiribagula V. B., Amuri S. B., Kalonji S. M., Byanga J. K., Duez P., Simbi J. B. L., 2017. Étude ethnobotanique, phytochimique et évaluation de l'activité antipaludiale de 13 plantes réputées antipaludéennes dans la commune du Kenya (Lubumbashi, RDC). *Phytothérapie*, <https://doi.org/10.1007/s10298-017-1152-x>
- Faruque M. O., Feng G., Khan Md. N. A., Barlow J. W., Ankhil U R., Hu S., et al., 2019. Qualitative and quantitative ethnobotanical study of the Pangkhua community in Bilaichari Upazilla, Rangamati District, Bangladesh. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 15: 8. <https://doi.org/10.1186/s13002-019-0287-2>
- Gomez Marín E., Merino Cristóbal L., 1990. *Plantas Medicinales de Guinea Ecuatorial*. Malabo, Guinea Ecuatorial, Centro cultural Hispano-Guineano ediciones, 262 p. <https://core.ac.uk/download/pdf/158825712.pdf>
- Idowu O. A., Soniran O. T., Ajana O., Aworinde D. O., 2010. Ethnobotanical survey of antimalarial plants used in Ogun State, Southwest Nigeria. *African Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 4 (2): 055-060. https://academicjournals.org/article/article1380869467_idowu%20et%20al.pdf
- Ilumbe Bayeli G., 2010. Utilisation des plantes en médecine traditionnelle par les Pygmées (Ba-Twa) et les Bantous (Ba-Oto) du territoire de Bikoro, Province de l'Équateur en République Démocratique du Congo. Thèse de doctorat, Université libre de Bruxelles, Belgique. <https://difusion.ulb.ac.be/vufind/Record/ULB-DIPOT:oai:dipot.ulb.ac.be:2013/210007/TOC>
- IUCN, 2019. The IUCN Red List of Threatened Species. <http://www.iucnredlist.org>
- Iyamah P. C., Idu M., 2015. Ethnomedicinal survey of plants used in the treatment of malaria in Southern Nigeria. *Journal of Ethnopharmacology*, 173: 287-302. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2015.07.008>
- Kamatenesi-Mugisha M., Oryem-Origa H., 2005. Traditional herbal remedies used in the management of sexual impotence and erectile dysfunction in western Uganda. *African Health Sciences*, 5 (1): 40-49. <https://www.ajol.info/index.php/ahs/article/view/6896>
- Kami T., Moustambote J.-M., Nzobadila E. K., Atencia R., 2019. Floristic and phytogeographical analysis at east Conkouati-Douli National Park (Republic of Congo). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 27 (1): 122-132. <https://www.semanticscholar.org/paper/Floristic-and-phytogeographical-analysis-at-east-of-Kami-Moustambote/c7f835cb35d45f53d1f3a2217267943b637dbae/>
- Kalonda E. M., Mbayo M., Muhume S. K., Kasereka M., Mulamba J. M., Mboni M., et al., 2014. Ethnopharmacological survey of plants used against malaria in Lubumbashi city (D.R. Congo). *Journal of Advanced Botany and Zoology*, 1 (2): 1-8. <https://pdfs.semanticscholar.org/dcf2/21824f3d63d28188196d7b18be0b7ab0e30c.pdf>
- Karhagomba I. B., Mirindi T. A., Mushagalusa T. B., Nabino V. B., Koh K., Kim H. S., 2013. The cultivation of wild food and medicinal plants for improving community livelihoods: The case of the Buhozi site, DR Congo. *Nutrition Research and Practice*, 7 (6): 510-518. <https://doi.org/10.4162/nrp.2013.7.6.510>
- Kasali F. M., Mahano A. O., Kadima N. J., Mpiana P. T., Ngobolua K. N., Tshibangu T. S. D., 2014a. Ethnopharmacological survey of medicinal plants used against malaria in Butembo city (D.R. Congo). *Journal of Advanced Botany and Zoology*, 1 (1): 1-11.
- Kasali F. M., Mahano A. O., Nyakabwa D. S., Kadima N. J., Misakabu F. M., Tshibangu D. S. T., et al., 2014b. Ethnopharmacological survey of medicinal plants used against malaria in Bukavu city (D.R. Congo). *European Journal of Medicinal Plants*, 4 (1): 29-44. <https://doi.org/10.9734/EJMP/2014/5766>
- Kasika E. L., Vasombolwa V. K., Lejoly J., 2015. Contribution to the knowledge of plants used by Bantu and Pygmy healers in Beni and Lubero territories (Democratic Republic of Congo). *Journal of Plant Studies*, 4 (2): 157-176. <https://doi.org/10.5539/jps.v4n2p157>
- Kayani S., Ahmad M., Zafar M., Sultana S., Khan M. P. Z., Ashraf M. A., et al., 2014. Ethnobotanical uses of medicinal plants for respiratory disorders among the inhabitants of Gallies-Abbottabad, Northern Pakistan. *Journal of Ethnopharmacology*, 156: 47-60. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2014.08.005>
- Kikufi A., Lukoki F., 2008. Étude floristique et écologique des marais de Masina. *Revue Congolaise des Sciences Nucléaires*, 23 (1) : 1-19. https://www.academia.edu/8827362/ETUDE_FLORISTIQUE_ET_ECOLOGIQUE_DES_MARAIS_DE_MASINA
- Kikufi A., Lejoly J., Lukoki F., 2017. État actuel de la biodiversité végétale du territoire de Kimvula au sud-ouest de la République Démocratique du Congo. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 19 (4) : 929-943. <https://studylibfr.com/doc/4262611/%C3%A9tat-actuel-de-la-biodiversit%C3%A9-v%C3%A9g%C3%A9t%C3%A9-tale-du-territoire>
- Kodi P., Mwangi E. M., Cheplogoi P. K., Kariruki T. S., 2017. Ethnobotanical survey of antimalarial medicinal plants used in Butebo County, Eastern Uganda. *European Journal of Medicinal Plants*, 21 (4): 1-22. <https://doi.org/10.9734/EJMP/2017/35368>
- Konda M., Kabakura M., Mbembe B., Itufa O., Mahuku K., Mafuta M., et al., 2012. Plantes médicinales de traditions, Province de l'Équateur – R.D. Congo. Ouagadougou, Burkina Faso, Institut de recherche en sciences de la santé (IRSS), 420 p. <http://www.ethnopharmacologia.org/prelude2018/pdf/biblio-hk-60-konda-ku-mbuta.pdf>
- Koudouvo K., Karou D. S., Kokou K., Essien K., Aklikokou K., Glioth I. A., et al., 2011. An ethnobotanical study of antimalarial plants in Togo Maritime Region. *Journal of Ethnopharmacology*, 134: 183-190. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2010.12.011>
- Kuete V., Efferth T., 2010. Cameroonian medicinal plants: pharmacology and derived natural products. *Frontiers in Pharmacology*, 1: 1-19. <https://doi.org/10.3389/fphar.2010.00123>
- Lakouéténé D. P. B., Ndolngar G., Berké B., Moyen J.-M., Kosh Komba E., Zinga I., Silla S., et al., 2009. Enquête ethnobotanique des plantes utilisées dans le traitement du paludisme à Bangui. *Bulletin de la Société de Pharmacie de Bordeaux*, 148 : 123-138. <https://studylibfr.com/doc/887435/enqu%C3%AAt-e-thnobotanique-des-plantes-utilis%C3%A9es-dans-le-trai...>
- Landis S. H., Lokomba V., Ananth C. V., Atibu J., Ryder R. W., Hartmann K. E., et al., 2009. Impact of maternal malaria and under-nutrition on intrauterine growth restriction: a prospective ultrasound study in Democratic Republic of Congo. *Epidemiology and Infection*, 137: 294-304. <https://doi.org/10.1017/S0950268808000915>
- Lassa Kanda L., Kikufi Batoba A., Ilumbe Bayeu G., Biloso Moyene A., Masens Da Musa M., Habari Mulawa J.-P., et al., 2019. Étude floristique, écologique et phytogéographique des espèces utiles du territoire de Kimvula, R. D. Congo. *Congo Sciences*, 7 (2) : 91-101. http://congosciences.cd/images/vol7-juillet2019/LASSA_2019_Vol_7_N_2_Art_4.pdf
- Light J. E., Nessner C. E., Gustafsson D. R., Wise S. R., Voelker G., 2016. Remarkable levels of avian louse (Insecta: Phthiraptera) diversity in the Congo Basin. *Zoologica Scripta*, 45: 538- 551. <https://doi.org/10.1111/zsc.12170>
- Lusakibanza Manzo M., 2012. Étude phytochimique et pharmacologique de plantes antipaludiques utilisées en médecine traditionnelle congolaise. Thèse de doctorat, Université de Liège, Belgique, 223 p. <http://bic.tel.ulg.ac.be/ETD-db/collection/available/ULgetd-07032012-191612/unrestricted/theseLusakibanza.pdf>
- Madureira M. C., Martins A. P., Gomes M., Paiva J., Cunha A. P., Rosário V., 2002. Antimalarial activity of medicinal plants used in traditional medicine in S. Tomé and Príncipe islands. *Journal of Ethnopharmacology*, 81: 23-29. [https://doi.org/10.1016/S0378-8741\(02\)00005-3](https://doi.org/10.1016/S0378-8741(02)00005-3)

- Mahomoodally M. F., 2013. Traditional medicines in Africa: An appraisal of ten potent African medicinal plants. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2013: 1-14. <https://doi.org/10.1155/2013/617459>
- Makumbelo E., Lukoki L., Paulis J. J. S. J., Luyindula N., 2008. Stratégie de valorisation des espèces ressources des produits non ligneux de la savane des environs de Kinshasa. II. Enquête ethnobotanique (aspects médicinaux). *Tropicicultura*, 26 (3) : 129-134. <http://www.tropicultura.org/text/v26n3/129.pdf>
- Mamadou A. J., Douma S., Inoussa M. M., Moussa S., Mahamane A., Saadou M., 2019. Diversity, life forms, chorology and uses of spontaneous medicinal plants in Niamey and Tillabéri Regions, Niger Republic. *Journal of Applied Life Sciences International*, 22 (4): 1-17. <https://doi.org/10.9734/jalsi/2019/v22i430134>
- Mangambu M. J. D., Aluma K. J.-Y., Diggelen R. V., Rugenda-Banga R. A. D., Mushangalusa K. F., Chibembe S. A., et al., 2015a. Études ethnobotanique et ethnolinguistique des ressources forestières ligneuses utilisées par la population du couloir écologique du Parc National de Kahuzi-Biega (RD Congo). *European Scientific Journal*, 11 (15) : 135-162. <https://core.ac.uk/download/pdf/236412252.pdf>
- Mangambu M. J. D., Diggelen R. V., Mwanga Mwanga J. C., Ntahobavuka H., Malaisse F., Robbrecht E., 2012. Étude ethnoptéridologique, évaluation des risques d'extinction et stratégies de conservation aux alentours du Parc National de Kahuzi Biega (RD Congo). *Geo-Eco-Trop*, 36 : 137-158. http://www.geoecotrop.be/uploads/publications/pub_361_09.pdf
- Mangambu M. J. D., Kavatsurwa M. S., Birhashirwa N. R., Habimana N. H., 2015b. Utilisation des ressources forestières ligneuses par la population habitant la zone submontagnarde du Parc National de Kahuzi-Biega (R.D. Congo). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 11 (2) : 508-521. <http://www.ijssr-journals.org/links/papers.php?journal=ijias&application=pdf&article=IJIAS-15-094-09>
- Manya M. H., Keymeulen F., Ngezahayo J., Bakari A. S., Kalonda M. E., Kahumba B. J., et al., 2020. Antimalarial herbal remedies of Bukavu and Uvira areas in DR Congo: An ethnobotanical survey. *Journal of Ethnopharmacology*, 249: 112422. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2019.112422>
- Masharabu T., Noret N., Lejoly J., Bigendako M. J., Bogaert J., 2010. Étude comparative des paramètres floristiques du Parc National de la Ruvubu, Burundi. *Geo-Eco-Trop*, 34 : 29-44. http://www.geoecotrop.be/uploads/publications/pub_341_02.pdf
- Masunda A. T., Inkoto C. L., Bongo G. N., Oloko J. D. O., Ngbolua K. N., Tshibangu D. S., et al., 2019. Ethnobotanical and ecological studies of plants used in the treatment of Diabetes in Kwango, Kongo Central and Kinshasa in Democratic Republic of the Congo. *International Journal of Diabetes and Endocrinology*, 4 (1): 18-25. <http://www.sciencepublishinggroup.com/journal/paperinfo?journalid=278&doi=10.11648/j.ijde.20190401.14>
- Mbala M. S., 2003. Situation des ressources génétiques forestières de la République démocratique du Congo. Note thématique sur les ressources génétiques forestières. Document de travail FGR/56F. Département des forêts, Division des ressources forestières. FAO, Rome, 48 p. <http://www.fao.org/forestry/124670ba027e46ab020c197c65d-1c023a230a7.pdf>
- Mbatchi S. F., Mbatchi B., Banzouzi J. T., Bansimba T., Nsonde Ntandou G. F., Ouamba J.-M., et al., 2006. In vitro antiplasmodial activity of 18 plants used in Congo Brazzaville traditional medicine. *Journal of Ethnopharmacology*, 104 (1-2): 168-174. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2005.08.068>
- Mbayo K. M., Kalonda M. E., Tshisand T. P., Kisimba K. E., Mulamba M., Kalunga R. M., et al., 2016. Contribution to ethnobotanical knowledge of some Euphorbiaceae used in traditional medicine in Lubumbashi and its surroundings (DRC). *Journal of Advanced Botany and Zoology*, 4 (2): 1-16. https://www.researchgate.net/profile/Marsi-Mbayo/publication/304806040_Contribution_to_ethnobotanical_knowledge_of_some_Euphorbiaceae_used_in_traditional_medicine_in_Lubumbashi_and_its_surroundings_DRC/links/577bb8a508ae355e74f16071/Contribution-to-ethnobotanical-knowledge-of-some-Euphorbiaceae-used-in-traditional-medicine-in-Lubumbashi-and-its-surroundings-DRC.pdf
- Mbula J. P., Kwembe J. T. K., Tshilanda D. D., Asimonio J., Toegaho A., Tshibangu D. S. T., et al., 2015. Ethnobotanical survey of aromatic plants of Masako Forest Reserve (Kisangani, DR Congo). *Journal of Advanced Botany and Zoology*, 2 (3): 1-9. <http://cd.chm-cbd.net/implementation/centre-de-surveillance-de-la-biodiversite-csb/botanique/ethnobotanique/ethnobotanical-survey-aromatic-plants-masako-forest-reserve-kisangani-dr-congo>
- Mbuyi K. S., Kalunga M. R., Kalonda M. E., Cimanga C. C. B., Numbi I. E., Kahumba B. J., et al., 2019. Aperçu ethnobotanique de plantes réputées antipaludéennes utilisées dans la ville de Lubumbashi et ses environs, dans le Haut-Katanga en RD Congo. *Ethnopharmacologia*, 61 : 75-84. <http://www.ethnopharmacologia.org/wp-content/uploads/2019/07/ETHNOPHARM-61-Mbuyi.pdf>
- Messina J. P., Taylor S. M., Meshnick S. R., Linke A. M., Tshifu A. K., Atua B., et al., 2011. Population, behavioural and environmental drivers of malaria prevalence in the Democratic Republic of Congo. *Malaria Journal*, 10: 161. <https://doi.org/10.1186/1475-2875-10-161>
- Mobula L., Lilley B., Tshifu A. K., Rosenthal P. J., 2009. Resistance-mediated Polymorphisms in *Plasmodium falciparum* infections in Kinshasa, Democratic Republic of the Congo. *American Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 80 (4): 555-558. <https://doi.org/10.4269/ajtmh.2009.80.555>
- Mongeke M. M., Ngbolua K. N., Bakola R. D., Inkoto C. L., Elikandani P. N., Mouli C. Y., 2018. Enquête sur les plantes utilisées en médecine traditionnelle par les Bambenga : Pygmées du secteur de Dongo en République Démocratique du Congo. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 6 (4) : 469-475. https://www.agrimaroc.org/index.php/Actes_IAPH2/article/view/617
- Muganga R., Angenot L., Tits M., Frédéric M., 2010. Antiplasmodial and cytotoxic activities of Rwandan medicinal plants used in the treatment of malaria. *Journal of Ethnopharmacology*, 128: 52-57. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2009.12.023>
- Muya K., Tshoto K., Cioci C. C., Aseho M. M., Kalonji M., Byanga K., et al., 2014. Survol ethnobotanique de quelques plantes utilisées contre la schistosomiase urogénitale à Lubumbashi et environs. *Phytothérapie*, 12 : 213-228. <https://doi.org/10.1007/s10298-014-0877-z>
- Mvumbi D. M., Kayembe J.-M., Situakibanza H., Bobanga T. L., Nsibu C. N., Mvumbi G. L., et al., 2015. Falciparum malaria molecular drug resistance in the Democratic Republic of Congo: a systematic review. *Malaria Journal*, 14: 354. <https://doi.org/10.1186/s12936-015-0892-z>
- Ndjele M. B., 1988. Les éléments phytogéographiques endémiques dans la flore vasculaire du Zaïre. Thèse de doctorat, Université libre de Bruxelles, Belgique, 536 p.
- Ndombe F. M., Ngbolua K. N., Masens B. Y. M., Mpiana P. T., 2016. Études ethnobotanique et écologique des plantes utilisées dans le traitement de la stérilité à Kenge et ses environs (Province du Kwango, République Démocratique du Congo). *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 26 (2) : 600-611. <http://www.ijssr-journals.org/abstract.php?article=IJISR-16-233-02>
- Ngarivhume T., Van't Klooster C. I. E. A., De Jong J. T. V. M., Van der Westhuizen J. H., 2015. Medicinal plants used by traditional healers for the treatment of malaria in the Chipinge district in Zimbabwe. *Journal of Ethnopharmacology*, 159: 224-237. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2014.11.011>
- Ngbolua K. N., Benamambote B. M., Mpiana P. T., Muanda D. M., Ekutsu E., Tshibangu D. S. T., et al., 2013a. Ethno-botanical survey and ecological study of some medicinal plants species traditionally used in the District of Bas-Fleuve (Bas-Congo Province, Democratic Republic of Congo). *Research Journal of Chemistry*, 1 (2): 1-10. https://www.researchgate.net/publication/258167541_Ethno-botanical_survey_and_Ecological_Study_of_some_Medicinal_Plants_species_traditionally_used_in_the_District_of_Bas-Fleuve_Bas-Congo_Province_Democratic_Republic_of_Congo
- Ngbolua K. N., Mudogo V., Mpiana P. T., Malekani M. J., Rafatro H., Ratsimamanga S. U., et al., 2013b. Évaluation de l'activité antidrépanocytaire et antipaludique de quelques taxons végétaux de la République démocratique du Congo et de Madagascar. *Ethnopharmacologie*, 50 : 7-12.
- Ngbolua K. N., Inkoto C. L., Mongo N. L., Ashande C. M., Masens Y. B., Mpiana P. T., 2019. Étude ethnobotanique et floristique de quelques plantes médicinales commercialisées à Kinshasa, République Démocratique du Congo. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 7 (1) : 118-128. <https://core.ac.uk/download/pdf/230580865.pdf>
- Ngbolua K. N., Mandjo L. B., Munsebi M. J., Ashande C. M., Moke E. L., Asambo S. L., et al., 2015. Études ethnobotanique et écologique des plantes utilisées en médecine traditionnelle dans le District de la Lukunga à Kinshasa (RD du Congo). *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 26 (2) : 612-633. <http://www.ijssr-journals.org/abstract.php?article=IJISR-16-233-03>

Ngbolua K. N., Mpiana P. T., Mudogo V., Ngombe N. K., Tshibangu D. S. T., Ekutsu E., *et al.*, 2014. Ethno-pharmacological survey and floristical study of some medicinal plants traditionally used to treat infectious and parasitic pathologies in the Democratic Republic of Congo. *International Journal of Medicinal Plants*, 106: 454-467.

Ngbolua K. N., Mihigo S. O., Liyongo C. I., Ashande M. C., Tshibangu D. S. T., Zoawe B. G., *et al.*, 2016. Ethno-botanical survey of plant species used in traditional medicine in Kinshasa city (Democratic Republic of the Congo). *Tropical Plant Research*, 3 (2): 413-427. <https://www.tropicalplantresearch.com/archives/2016/vol3issue2/24.pdf>

Nsonde-Ntandou G. F., Ndounga M., Ouamba J. M., Gbeassor M., Etou-Ossebi A., Ntoui M., *et al.*, 2005. Enquête ethnobotanique : screening chimique et efficacité thérapeutique de quelques plantes utilisées contre le paludisme en médecine traditionnelle à Brazzaville. *Phytothérapie*, 3 : 13-18. <https://doi.org/10.1007/s10298-005-0059-0>

Ntie-Kang F., Onguéné P. A., Lifongo L. L., Ndom J. C., Sippl W., Meva'a Mbaze L., 2014. The potential of anti-malarial compounds derived from African medicinal plants. Part II: A pharmacological evaluation of non-alkaloids and non-terpenoids. *Malaria Journal*, 13: 81. <https://doi.org/10.1186/1475-2875-13-81>

Nzuki B. F., 2016. Recherches ethnobotaniques sur les plantes médicinales dans la région de Mbanza-Ngungu, RDC. Thèse de doctorat (PhD), Université de Gand, Belgique, 349 p. <https://biblio.ugent.be/publication/8205211/file/8205212>

Okello D., Kang Y., 2019. Exploring antimalarial herbal plants across communities in Uganda based on electronic data. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine, ID 3057180. <https://doi.org/10.1155/2019/3057180>

Ong H. G., Ling S. M., Win T. T. M., Kang D.-H., Lee J.-H., Kim Y.-D., 2018. Ethnobotany of wild medicinal plants used by the Müün ethnic people: A quantitative survey in southern Chin State, Myanmar. *Journal of Herbal Medicine*, 13: 91-96. <https://doi.org/10.1016/j.hermed.2017.09.006>

Raj A. J., Biswakam S., Pala N. A., Shukla G., Vineeta, Kumar M., Chakravarty S., *et al.*, 2018. Indigenous uses of ethnomedicinal plants among forest-dependent communities of Northern Bengal, India. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 14: 8. <https://doi.org/10.1186/s13002-018-0208-9>

Saotoing P., Vroumsia T., Tchobsala, Tchuenguem F. F.-N., Njan N. A.-M., Messi J., 2011. Medicinal plants used in traditional treatment of malaria in Cameroon. *Journal of Ecology and the Natural Environment*, 3 (3): 104-117. <https://academicjournals.org/journal/JENE/article-abstract/5E8F71C6080>

Silva J. R. A., Ramos A. S., Machado M., Moura D. F., Neto Z., Canto-Cavaleiro M. M., *et al.*, 2011. A review of antimalarial plants used in traditional medicine in communities in Portuguese-speaking countries: Brazil, Mozambique, Cape Verde, Guinea-Bissau, São Tomé and Príncipe and Angola. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 106 (1): 142-158. <https://doi.org/10.1590/S0074-02762011000900019>

Swana E. K., Yav T. I., Ngweij L. M., Mupemba B. N., Suprianto, Mukeng C. K., *et al.*, 2018. School-based malaria prevalence: informative systematic surveillance measure to assess epidemiological impact of malaria control interventions in Democratic Republic of the Congo. *Malaria Journal*, 17: 141. <https://doi.org/10.1186/s12936-018-2297-2>

Tabuti J. R. S., Lye K. A., Dhillion S. S., 2003. Traditional herbal drugs of Bulamogi, Uganda: plants, use and administration. *Journal of Ethnopharmacology*, 88: 19-44. [https://doi.org/10.1016/S0378-8741\(03\)00161-2](https://doi.org/10.1016/S0378-8741(03)00161-2)

Tabuti J. R. S., 2008. Herbal medicines used in the treatment of malaria in Budiope county, Uganda. *Journal of Ethnopharmacology*, 116: 33-42. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2007.10.036>

Taek M. M., Ew B. P., Agil M., 2018. Ethnomedicinal plants used for the treatment of malaria in Malaka, west Timor. *Journal of Young Pharmacists*, 10 (2): 187-192. https://www.jyoungpharm.org/sites/default/files/JYoungPharm_10_2_187_0.pdf

Terashima H., Ichikawa M., 2003. A comparative ethnobotany of the Mbuti and Efe Hunter-gatherers in the Ituri forest, Democratic Republic of Congo. *African Study Monographs*, 24 (1-2): 1-168. <https://core.ac.uk/download/pdf/39201366.pdf>

Titanji V. P. K., Zofou D., Ngemenya M., 2008. The antimalarial potential of medicinal plants used for the treatment of malaria in Cameroonian folk medicine. *African Journal of Traditional, Complementary and Alternative Medicines*, 5 (3): 302-321. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2816552/>

Tor-anyiin T. A., Sha'ato R., Oluma H. O. A., 2003. Ethnobotanical survey of anti-malarial medicinal plants amongst the Tiv people of Nigeria. *Journal of Herbs, Spices & Medicinal Plants*, 10 (3): 61-74. https://doi.org/10.1300/J044v10n03_07

Traore M. S., Baldé M. A., Diallo M. S. T., Baldé E. S., Diané S., Camara A., *et al.*, 2013. Ethnobotanical survey on medicinal plants used by Guinean traditional healers in the treatment of malaria. *Journal of Ethnopharmacology*, 150: 1145-1153. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2013.10.048>

Umair M., Altaf M., Bussmann R. W., Abbasi A. M., 2019. Ethnomedicinal uses of local flora in Chenab riverine area, Punjab province, Pakistan. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 15: 7. <https://doi.org/10.1186/s13002-019-0285-4>

UNESCO, 2010. Le Patrimoine mondial dans le Bassin du Congo. Centre du Patrimoine mondial de l'UNESCO, 64 p. <https://whc.unesco.org/fr/activites/628/>

Vijayakumar S., Yabesh J. E. M., Prabhu S., Manikandan R., Muralidharan B., 2015. Quantitative ethnomedicinal study of plants used in the Nelliampathy hills of Kerala, India. *Journal of Ethnopharmacology*, 161: 238-254. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2014.12.006>

WHO, 2019. World Malaria Report 2019. World Health Organization, 232 p. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241565721>

Yetein M. H., Houessou L. G., Lougbégnon T. O., Teka O., Tente B., 2013. Ethnobotanical study of medicinal plants used for the treatment of malaria in plateau of Allada, Benin (West Africa). *Journal of Ethnopharmacology*, 146: 154-163. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2012.12.022>

Zarei L., Naji-Haddadi S., Pourjabali M., Naghdi N., Tasbih-Forosh M., Shahsavari S., 2017. Systematic review of anti-Rheumatic Medicinal plants: An overview of the effectiveness of articular tissues and joint pain associated with Rheumatoid arthritis. *Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 9 (5): 547-551. <https://www.jpsr.pharmainfo.in/Documents/Volumes/vol9issue05/jpsr09051706.pdf>

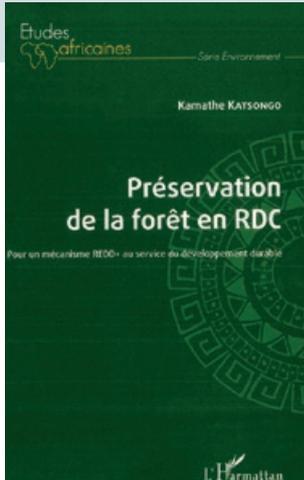
Rusaati *et al.* – Authors' contributions

Contributor role	Contributor names
Conceptualization	B. I. W. Rusaati, J. W. Kang
Data curation	J. W. Kang
Formal Analysis	B. I. W. Rusaati
Investigation	B. I. W. Rusaati
Methodology	B. I. W. Rusaati, A. P. Gendusa
Resources	J. W. Park, S. H. Joo
Supervision	J. W. Kang
validation	J. W. Kang, N. C. Masumbuko
Visualisation	B. I. W. Rusaati
Writing- original draft preparation	B. I. W. Rusaati
Writing- Review and Editing	N. C. Masumbuko, K. G. Iragi, K. T. N. Ngbolua, M. A. Furaha, N. K. Rolly

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

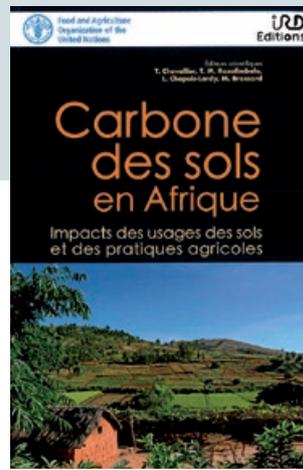


KATSONGO K., 2020. **PRÉSERVATION DE LA FORÊT EN RDC – POUR UN MÉCANISME REDD+ AU SERVICE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE.** FRANCE, ÉDITIONS L'HARMATTAN, XXI-332 P.

Le mécanisme REDD (Réduction des Émissions dues à la Déforestation et à la Dégradation forestière) est un mécanisme créé pour inciter économiquement les grands pays forestiers tropicaux à éviter la déforestation et la dégradation des forêts. Le programme REDD+ va au-delà de la déforestation et de la dégradation des forêts et inclut la gestion durable et la conservation des forêts ainsi que le renforcement des stocks de carbone liés à la forêt. La REDD+ représente-t-elle alors une opportunité pour la RDC de promouvoir un développement humain et durable ? Fondée sur une recherche documentaire importante et l'observation participante, cette étude montre que la gouvernance du processus REDD+ en RDC est fragile et inachevée.

Adapté du résumé de l'éditeur.

Éditions L'Hamattan, 5-7 rue de l'École Polytechnique,
75005 Paris, France.
www.editions-harmattan.fr/



CHEVALLIER T., RAZAFIMBELO-ANDRIAMIFIDY T., CHAPIUS-LARDY L., BROSSARD M. (DIRS), 2020. **CARBONE DES SOLS EN AFRIQUE : IMPACTS DES USAGES DES SOLS ET DES PRATIQUES AGRICOLES.** FRANCE, IRD ÉDITIONS, FAO, 268 P.

Les sols sont une ressource essentielle à préserver pour la production d'aliments, de fibres, de biomasse, pour la filtration de l'eau, la préservation de la biodiversité et le stockage du carbone. En tant que réservoirs de carbone, les sols sont par ailleurs appelés à jouer un rôle primordial dans la lutte contre l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre. Ils sont ainsi au centre des objectifs de développement durable (ODD) des Nations unies, notamment les ODD « Faim zéro », « Lutte contre le changement climatique », « Vie terrestre », « Consommation et production responsables » ou encore « Pas de pauvreté ». Cet ouvrage présente un état des lieux des sols africains dans toute leur diversité, mais au-delà, il documente les capacités de stockage de carbone selon les types de sols et leurs usages en Afrique. Il propose également des recommandations autour de l'acquisition et de l'interprétation des données, ainsi que des options pour préserver, voire augmenter les stocks de carbone dans les sols. Tous les chercheurs et acteurs du développement impliqués dans les recherches sur le rôle du carbone des sols sont concernés par cette synthèse collective. Fruit d'une collaboration entre chercheurs africains et européens, ce livre insiste sur la nécessité de prendre en compte la grande variété des contextes agricoles et forestiers africains pour améliorer nos connaissances sur les capacités de stockage de carbone des sols et lutter contre le changement climatique. Cet ouvrage est une contribution du réseau Carbone des sols pour une agriculture durable en Afrique (Casa). Les objectifs du réseau Casa s'inscrivent dans le cadre de l'Action commune de Koronivia pour l'Agriculture (*Koronivia Joint Work on Agriculture*, KJWA). Adoptée en 2017, lors de la 23^e conférence des Parties (COP 23), la KJWA fournit un cadre pour renforcer la place de l'agriculture dans les discussions internationales sur le climat, à la fois pour son rôle dans la réduction de la concentration en gaz à effet de serre dans l'atmosphère et sa nécessaire adaptation face au changement climatique.

Adapté du résumé de l'éditeur.

IRD Éditions, 911 avenue Agropolis, BP 65501,
34394 Montpellier cedex 5, France.
www.editions.ird.fr

Variabilité des utilisations de *Diospyros mespiliformis* Hochst. suivant les facteurs sociodémographiques au Nord-Bénin

Alain DAANON¹
Elie Antoine PADONOU²
Bokon Alexis AKAKPO^{1, 3}
Marcel HOUINATO¹

¹ Université d'Abomey-Calavi
Faculté des sciences agronomiques
Laboratoire d'écologie appliquée
01 BP 526, Cotonou
Bénin

² Université nationale d'agriculture
École de foresterie tropicale
BP 43, Kétou
Bénin

³ WASCAL (West African Science
Service Centre on Climate Change
and Adapted Land Use)
Federal University of Technology
PMB 65 Minna, Niger State
Nigeria

Auteur correspondant /
Corresponding author:
Bokon Alexis AKAKPO –
ab_akakpo@yahoo.fr

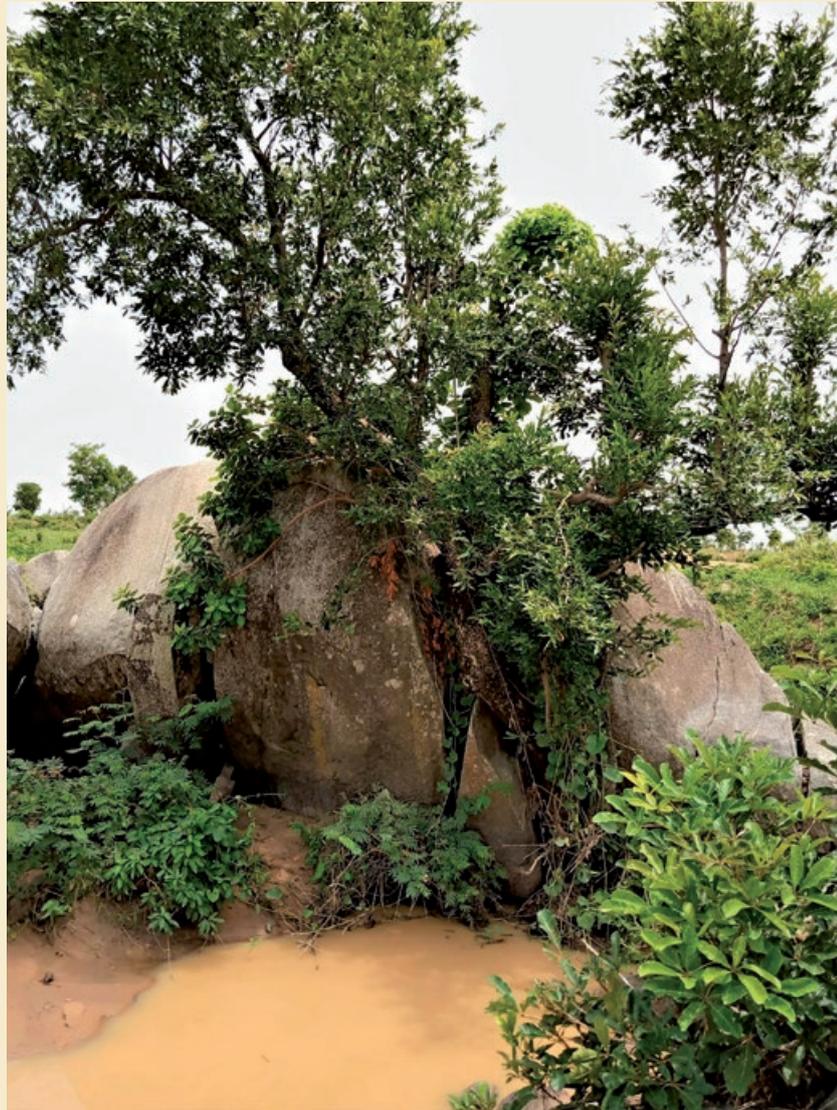


Photo 1.
Arbre de *Diospyros mespiliformis* en peuplement naturel.
Tree of Diospyros mespiliformis in a natural stand.
Photo A. Daanon.

Doi : 10.19182/bft2021.347.a36344 – Droit d'auteur © 2021, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 24 février 2020 ; date d'acceptation : 26 octobre 2020 ; date de publication : 25 février 2021.



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

Citer l'article / To cite the article

Daanon A., Padonou E. A., Akakpo B. A., Houinato M., 2021. Variabilité des utilisations de *Diospyros mespiliformis* Hochst. suivant les facteurs sociodémographiques au Nord-Bénin. Bois et Forêts des Tropiques, 347: 29-40. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2021.347.a36344>

RÉSUMÉ

Variabilité des utilisations de *Diospyros mespiliformis* Hochst. suivant les facteurs sociodémographiques au Nord-Bénin

Diospyros mespiliformis est une espèce d'arbre très peu étudiée malgré son importance pour les communautés locales au Bénin. Cette étude a évalué la variabilité des usages de l'espèce et de ses organes suivant les facteurs sociodémographiques (la provenance, les catégories socioculturelles, le sexe, l'âge et la profession des utilisateurs). Une enquête auprès de 233 participants a été réalisée dans les communes de Tchaourou, Sinendé et Bembèrèkè. La fréquence de citation, les usages rapportés et l'indice d'importance des organes de l'espèce ont été calculés. Des analyses de la covariance sur les usages totaux rapportés ont été réalisées afin d'évaluer les déterminants des usages de l'espèce. Des analyses en composantes principales ont été effectuées afin de caractériser les usages, suivant les déterminants des usages de l'espèce. Les résultats ont révélé que le sexe, l'âge et la provenance socioculturelle ($P < 0,05$) ont déterminé les usages dans la zone d'étude. Les hommes adultes ont eu plus d'intérêt pour l'espèce. Les Peuhls de Tchaourou et les Bariba de Sinendé ont utilisé davantage l'espèce comme bois énergie et bois d'œuvre. Les Bariba de Tchaourou, de Sinendé et les Peuhls de Sinendé sont plus intéressés par l'espèce pour des usages alimentaires, le fourrage et la pharmacopée. L'utilisation des organes est déterminée par l'âge et les interactions provenance-profession-âge ($P < 0,05$). Les racines et les écorces sont les parties les plus appréciées par les adultes et les personnes âgées. Les éleveurs, en général, et les agriculteurs de Tchaourou sont particulièrement intéressés par les racines, les tiges et les noix de l'espèce. Les agriculteurs de Bembèrèkè et les commerçants de Sinendé et de Bembèrèkè sont, quant à eux, plus enclins à l'usage des écorces. Par ailleurs, les usages de l'espèce en tant que bois et fourrage ont affecté négativement ($P < 0,000$) son usage alimentaire. Ces résultats sont à prendre en compte pour une stratégie de valorisation et de conservation durable de l'espèce.

Mots-clés : *Diospyros mespiliformis*, importance ethnobotanique, variabilité des usages, Nord-Bénin.

ABSTRACT

Variability in uses of *Diospyros mespiliformis* Hochst. according to socio-demographic factors in northern Benin

Diospyros mespiliformis is a tree species that has been very little studied despite its importance for local communities in Benin. This study assessed the variability of uses of the species and its organs according to socio-economic factors (origin, socio-cultural background and categories, gender, age and professions). A survey among 233 participants was conducted in the municipalities of Tchaourou, Sinendé and Bembèrèkè. Citation frequencies, reported uses and the index of importance of the different organs were calculated. Covariance analyses of all reported uses were performed to assess the factors determining uses of the species. Principal Component Analyses were performed to characterise these uses according to the determinants of species use. The results show that in the study zone, uses were determined by gender, age and socio-cultural background ($P < 0.05$). Adult men had more interest than others in the species. The Fulani from Tchaourou and the Bariba from Sinendé used the species most for fuel and timber. The Bariba from Tchaourou and Sinendé and the Fulani from Sinendé had more interest in the species for food, fodder and medicinal uses. Uses of the different organs were determined by age and origin-profession-age interactions ($P < 0.05$). The roots and bark were most used by adults and elderly people. Herders in general and the farmers from Tchaourou were interested more specifically in the roots, stems and fruits of the species. The farmers from Bembèrèkè and traders from Sinendé and Bembèrèkè had a greater tendency to use the bark. Furthermore, uses of the species for its wood and for fodder had a negative effect ($P < 0.000$) on its uses for food. These results should be taken into account in designing a strategy for the sustainable use and conservation of the species.

Keywords: *Diospyros mespiliformis*, ethnobotanical importance, variability of uses, northern Benin.

RESUMEN

Variabilidad de los usos del *Diospyros mespiliformis* Hochst. según los factores sociodemográficos en el norte de Benín

Diospyros mespiliformis es una especie de árbol muy poco estudiada a pesar de su importancia para las comunidades locales de Benín. Este estudio evaluó la variabilidad de los usos de la especie y de sus órganos según los factores sociodemográficos (origen, categorías socioculturales, sexo, edad y profesión de los usuarios). Se realizó una encuesta a 233 participantes en los municipios de Tchaourou, Sinendé y Bembèrèkè. Se calcularon la frecuencia de citas, los usos citados y el índice de importancia de los órganos de la especie. Se efectuaron análisis de la covarianza sobre los usos totales citados para evaluar los factores determinantes en los usos de la especie. Se realizaron análisis de componentes principales para caracterizar los usos, según los determinantes de los usos de la especie. Los resultados revelaron que el sexo, la edad y el origen sociocultural ($P < 0,05$) determinaron los usos en la zona de estudio. Los hombres adultos tenían más interés por la especie. Los Peuhl de Tchaourou y los Bariba de Sinendé utilizaban más la especie como leña y madera de construcción. Los Bariba de Tchaourou, de Sinendé y los Peuhl de Sinendé están más interesados por la especie para usos alimentarios, forraje y farmacopea. El uso de órganos viene determinado por la edad y las interacciones origen-profesión-edad ($P < 0,05$). Las raíces y las cortezas son las partes más utilizadas por los adultos y los ancianos. Los ganaderos, en general, y los agricultores de Tchaourou están especialmente interesados en las raíces, los tallos y las nueces de la especie. Los agricultores de Bembèrèkè y los comerciantes de Sinendé y de Bembèrèkè están más orientados al uso de las cortezas. Asimismo, los usos de la especie como madera y forraje afectaron negativamente ($P < 0,000$) su utilización alimentaria. Hay que tener en cuenta estos resultados para elaborar una estrategia de valorización y de conservación sostenible de la especie.

Palabras clave: *Diospyros mespiliformis*, importancia etnobotánica, variabilidad de usos, norte de Benín.

Introduction

Les fruitiers sauvages jouent un rôle prépondérant dans le quotidien des communautés rurales. De nos jours, ils occupent une place importante dans les industries agroalimentaires et pharmaceutiques à travers le monde (Mapongmetsem *et al.*, 2012). Ils sont utilisés à des fins de consommation directe, commerciales et médicinales (Idohou *et al.*, 2013 ; Maxted *et al.*, 2008). Ce sont des compléments alimentaires pendant les périodes de soudure (Diarra *et al.*, 2016). Durant ces dernières années, au Bénin, de nombreuses études ont été effectuées concernant les diverses contributions que peuvent apporter les fruitiers sauvages. C'est le cas, par exemple, de leur participation dans l'alimentation des populations locales (Lougbeignon *et al.*, 2015 ; Akouehou *et al.*, 2014 ; Fandohan *et al.*, 2010), la diversité de leurs produits (Assogbadjo *et al.*, 2009 ; Codjia *et al.*, 2003), la diversité des usages et l'importance socioculturelle et socio-économique de leurs différents constituants (Gouwakinnou *et al.*, 2011 ; Koura *et al.*, 2011 ; Ekué *et al.*, 2010 ; Fandohan *et al.*, 2010 ; Vodouhê *et al.*, 2009). Toutefois, très peu d'études ont été consacrées à *Diospyros mespiliformis* Hochst.

Diospyros mespiliformis Hochst. est un fruitier sauvage de la famille des Ebenaceae encore appelé ébénier d'Afrique (photo 1). Il est relativement négligé scientifiquement au Bénin, mais très fortement convoité dans plusieurs localités voisines pour plusieurs usages (Dossou-Yovo *et al.*, 2014 ; Djagoun *et al.*, 2010). Les individus de l'espèce se retrouvent en abondance dans les régions tropicales d'Afrique (du

Sénégal au Cameroun). D'après Bonnet *et al.* (2008), les arbres adultes de *D. mespiliformis* peuvent atteindre 30 m de hauteur. Son habitat varie généralement des forêts guinéennes, des galeries forestières à des bords de rivière, sur des termitières et des collines rocheuses. L'espèce se rencontre aussi sur les sols lourds et bien drainés (Arbonnier, 2002). C'est une espèce d'arbre à fragments de fleurs blanches (photo 2) qui produit des fruits dont la pulpe est très sucrée et très appréciée non seulement par les singes et les oiseaux, qui assurent sa dispersion en milieu naturel, mais aussi par les populations rurales (Arbonnier, 2002).

L'ébénier d'Afrique présente un très grand intérêt pour les différentes catégories sociodémographiques dans le Nord du Bénin (Vodouhê *et al.*, 2009). En effet, il est intensivement utilisé en alimentation, en médecine, en tant que bois de service et d'œuvre, en pratiques culturelles et autres (Vodouhê *et al.*, 2009). Cependant, malgré l'importance révélée de l'espèce pour les communautés locales, les connaissances restent faibles sur ses différentes utilisations (variabilité des utilisations suivant les caractéristiques sociodémographiques, organes récoltés, et interactions entre les différentes utilisations) possibles (Avocèvou-Ayisso *et al.*, 2012). Ainsi, il est très important de documenter les informations relatives à l'espèce sur ces différents aspects afin de réussir les stratégies de sa valorisation et gestion durable. Par ailleurs, en se basant sur des études antérieures, nous pouvons supposer que les utilisations et les parties collectées des espèces de fruitiers sauvages diffèrent

non seulement d'une catégorie socioculturelle à l'autre mais aussi entre les utilisateurs d'une même catégorie socioculturelle ne se retrouvant pas sur le même territoire. De même, un type d'utilisation peut influencer la possibilité d'utiliser l'espèce à d'autres fins (Avocèvou-Ayisso *et al.*, 2012). D'où les objectifs visés dans cette étude, consistant à caractériser les utilisations de *D. mespiliformis* suivant les différentes catégories sociodémographiques du milieu d'étude, à évaluer les usages ethnobotaniques des organes de l'espèce suivant ces différentes catégories sociodémographiques, et enfin à estimer l'influence des catégories d'utilisation sur le niveau d'usage alimentaire de l'espèce.



Photo 2.
Fruits immatures de *Diospyros mespiliformis*.
Immature fruits of *Diospyros mespiliformis*.
Photo A. Daanon.

Méthodes

Milieu d'étude et choix des localités d'enquête

Les enquêtes ont été effectuées dans les localités riveraines des forêts classées de Wari-Marou, Alibori Supérieur, Ouémé Supérieur, Trois Rivières, Tchaourou et Ouénou-Béno dans la région soudanienne au Bénin (figure 1), où la présence naturelle de *D. mespiliformis* (photo 3) a été fortement renseignée (Gnonlonfoun *et al.*, 2015 ; Djagoun *et al.*, 2010 ; Bonou *et al.*, 2009). Les forêts classées de Wari-Marou, de l'Ouémé Supérieur et de Tchaourou sont davantage situées dans la commune de Tchaourou. La forêt classée de l'Alibori Supérieur se trouve dans la commune de Sinendé et celles de Ouénou-Béno et de l'Ouémé Supérieur dans la commune de Bembèrèkè. Toutes ces communes sont sous l'influence d'un climat tropical du type soudanien humide, caractérisé par deux saisons de durée presque égale. En 2013, la population humaine y était en forte croissance (environ 4,6 %) (INSAE, 2016). Le nombre d'habitants en 2013 était de 223 138 à Tchaourou, 91 672 à Sinendé et 131 255 à Bembèrèkè (INSAE, 2016). Les principales catégories socioculturelles vivant dans ces communes sont constituées d'ethnies telles que les Bariba, les Nago, les Peuhls et les Wamma. Leurs principales activités sont la production agricole, l'élevage des ruminants et les petits commerces. Par ailleurs, ces groupes ethniques représentent

les couches les plus pauvres du Bénin. Leurs dépenses journalières restent inférieures à 1 USD (INSAE, 2016). Par conséquent, elles dépendent fortement des fruitiers sauvages, utilisés à des fins alimentaires (humain et animal), sanitaires (humain), d'infrastructures et soins de santé pour les animaux (Vodouhè *et al.*, 2009).

Méthode d'échantillonnage

L'échantillonnage dans cette étude a été réalisé en utilisant les données sociodémographiques des localités d'enquête (INSAE, 2016). Au total, 233 personnes ont été interviewées (139 hommes et 94 femmes) à leurs domiciles et dans les langues locales. Chaque catégorie sociodémographique a été proportionnellement représentée dans l'échantillon enquêté (tableau I). Celui-ci incluait les principales catégories socioprofessionnelles (agriculteurs ou producteurs agricoles, guérisseurs traditionnels ou tradipraticiens, éleveurs, artisans et commerçants). Les personnes enquêtées ont été sélectionnées en se basant également sur les classes d'âge (Assogbadjo *et al.*, 2008) ainsi que sur la volonté de consacrer son temps à l'interview, la période de collecte des données coïncidant avec le moment des différentes activités des populations. L'âge minimal des personnes enquêtées était de 15 ans environ, car à cet âge l'individu est capable d'explicitier l'utilisation qu'il fait de l'espèce (IUCN, 2014).

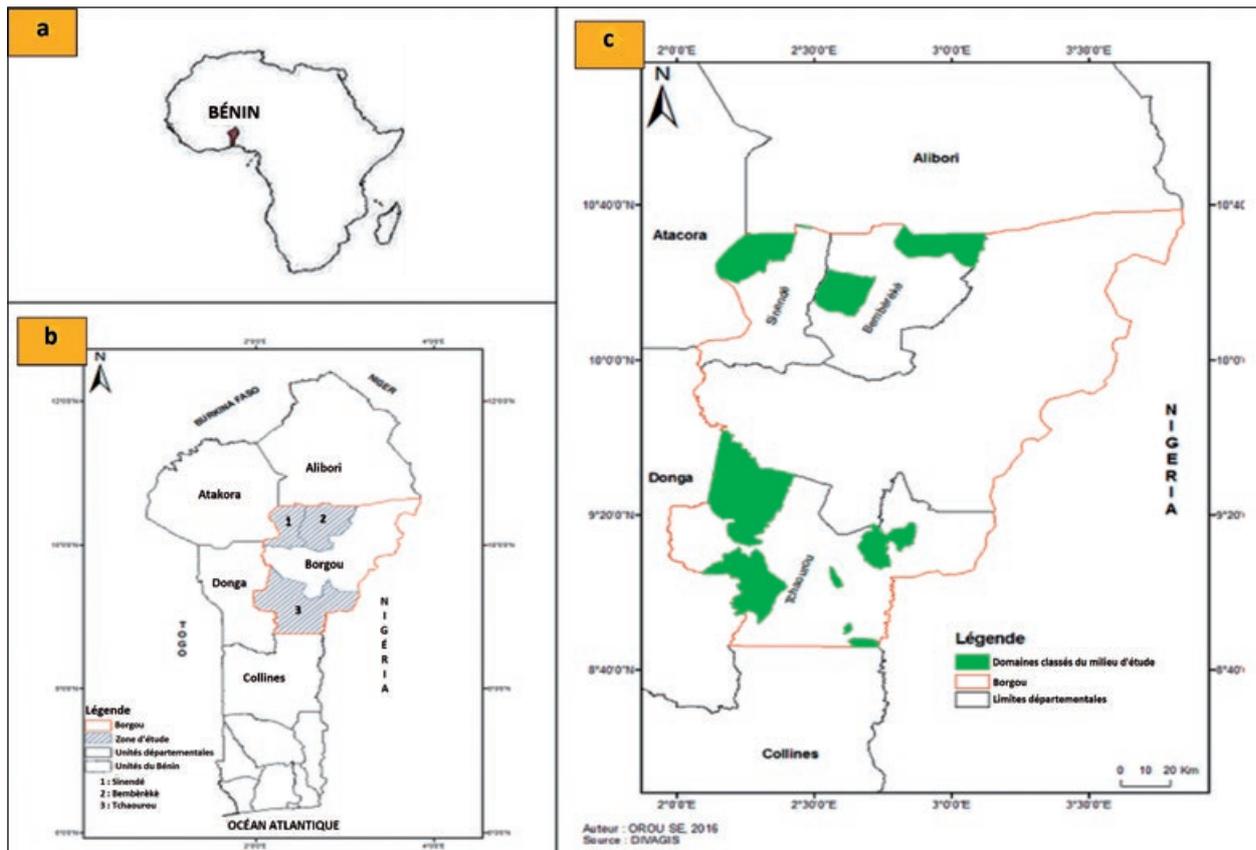


Figure 1.

a) Localisation du Bénin en Afrique. b) Localisation des communes dans lesquelles les enquêtes ont été effectuées.

c) Distribution des forêts classées riveraines des localités d'enquête.

a) Location of Benin in Africa. b) Location of the communes in which the surveys were carried out.

c) Distribution of classified forests bordering the survey localities.

Enquêtes ethnobotaniques

Les données ont été collectées à travers les observations des participants et des entretiens individuels et semi-structurés. Les enquêtes ont été effectuées sous le couvert de personnes-ressources de chaque localité. La fiche de collecte de données utilisée a renseigné principalement sur l'âge, le sexe, la catégorie socioculturelle, la profession ou l'activité principale et la provenance de l'enquêté. Pour ce qui concerne l'espèce, la fiche a visé les informations sur ses usages et les organes utilisés. Les données concernant l'importance culturelle de la plante et ses organes ont été également renseignées lors des entretiens. La liste des catégories d'usages adoptée s'est inspirée des usages obtenus par Vodouhê *et al.* (2009) : alimentaire, bois de service et d'œuvre, bois énergie, fourrage, médecine et autres. Les scores d'importance culturelle des catégories d'usages de la plante et de ses organes ont été attribués par chaque interviewé en s'appuyant sur la grille de Belem *et al.* (2008). Ces scores ont varié de 0 à 3, avec : 0 pour la catégorie d'usages la moins importante ; 1 pour la catégorie relativement importante ; 2 pour celle importante ; 3 pour la catégorie d'usages très importante.

Traitement et analyses des données

Le traitement des informations a été consacré au calcul des indices ethnobotaniques usuels documentés dans les travaux de Assogba *et al.* (2017) et de Lougbegnon *et al.* (2015). Il s'agit de la fréquence relative de citation, la valeur des usages totaux rapportés, la valeur des usages rapportés par organe, l'indice d'importance culturelle.

La fréquence relative de citation est le nombre de fois qu'un usage spécifique de l'espèce a été cité par les interviewés d'une catégorie socioculturelle rapporté au nombre total des interviewés de la même catégorie socioculturelle. La valeur élevée de cet indice révèle généralement un accord commun pour le type d'usage ou organe/partie utilisé au sein de la catégorie socioculturelle.

Les valeurs des usages rapportés (totaux et par organe/partie de la plante) représentent le nombre moyen d'usages spécifiques rapportés pour la plante et pour l'organe/partie de la plante dans chaque catégorie socioculturelle.



Photo 3.
 Peuplement forestier à dominance de *Diospyros mespiliformis*.
 Forest stand dominated by *Diospyros mespiliformis*.
 Photo A. Daanon.

L'indice d'importance se réfère à l'indice d'importance culturelle de l'espèce (Houehanou *et al.*, 2011). Il indique, d'une part, la valeur culturelle attribuée à la plante et, d'autre part, celle rapportée aux organes de la plante par les populations. Ainsi, ces indices ont mis en exergue la catégorie d'usages et l'organe/partie de la plante les plus importants, selon les facteurs sociodémographiques (âge, sexe, catégorie socioculturelle, provenance socioculturelle et groupe socioprofessionnel).

Des matrices de données sur ces indices en relation avec ces facteurs sociodémographiques ont été construites. Une analyse de la covariance sur les usages totaux rapportés a été effectuée afin d'évaluer les déterminants sociodémographiques qui ont influencé l'utilisation de l'espèce. La réalisation d'une analyse en composantes principales a permis de caractériser les utilisations de l'espèce suivant ces déterminants.

Tableau I.

Effectif des personnes enquêtées selon la catégorie sociodémographique, ethnique et le genre.
 Number of people surveyed by socio-demographic category, ethnicity and gender.

Catégorie sociodémographique	Bariba		Nago		Wamma		Peuhls		Total
	F	H	F	H	F	H	F	H	
Jeunes (âge < 30 ans)	7	8	10	9	5	7	3	4	53
Adultes (30 < âge < 60)	14	23	19	25	9	12	6	11	119
Vieux (âge ≥ 60 ans)	10	12	8	12	4	8	2	5	61
Total	31	43	37	46	18	27	11	20	233

F : femme ; H : homme.

Tableau II.

Résultats de l'analyse de la covariance sur les usages totaux rapportés de *Diospyros mespiliformis*.
Results of analysis of covariance on total reported uses of *Diospyros mespiliformis*.

Source de variation	DL	SS	MS	F value	Pr(>F)
Provenance	3	0,96	0,32	0,258	0,8551 ^{ns}
Catégorie socioculturelle	8	12,02	1,503	1,213	0,3085 ^{ns}
Sexe	1	4,99	4,986	4,024	0,0497*
Profession	4	0,95	0,237	0,191	0,9422 ^{ns}
Âge	1	5,47	5,469	4,414	0,0402*
Provenance × catégorie socioculturelle	1	6,01	6,013	4,853	0,0317*
Provenance × sexe	1	1,37	1,37	1,106	0,2975 ^{ns}
Catégorie socioculturelle × sexe	3	5,36	1,786	1,442	0,2404 ^{ns}
Provenance × profession	6	11,23	1,871	1,51	0,1916 ^{ns}
Catégorie socioculturelle × profession	5	1,97	0,394	0,318	0,9003 ^{ns}
Sexe × profession	2	0,62	0,312	0,252	0,7781 ^{ns}
Provenance × âge	2	6,71	3,356	2,709	0,0754 ^{ns}
Catégorie socioculturelle × âge	5	9,71	1,942	1,567	0,1844 ^{ns}
Sexe × âge	1	0,39	0,392	0,316	0,5762 ^{ns}
Profession × âge	3	7,5	2,501	2,019	0,1217 ^{ns}
Provenance × sexe × âge	1	2,9	2,902	2,342	0,1315 ^{ns}
Provenance × profession × âge	3	5,87	1,956	1,578	0,2048 ^{ns}
Résiduels	56	69,39	1,239		

DL : degré de liberté ; SS : somme des carrés des écarts ; MS : carré moyen ; F value : statistique de Fisher ;

Pr(>F) : valeur de probabilité associée.

Codes du niveau de significativité : 0,000 = *** ; 0,001 = ** ; 0,01 = * ; > 0,05 = non significatif (ns).

X × Y : interaction entre deux variables ; X × Y × Z : interaction entre trois variables.

L'étude s'est également focalisée sur l'évaluation de l'importance des usages ethnobotaniques des organes de l'espèce suivant les catégories sociodémographiques. Une analyse de la covariance a été effectuée pour faire ressortir les déterminants (facteurs) sociodémographiques qui ont influencé l'utilisation des différents organes de l'espèce. Les valeurs des usages rapportés par organe ont été soumises à une analyse en composantes principales afin de déterminer les relations entre les différents usages des organes et les déterminants sociodémographiques. Auparavant, un modèle linéaire généralisé simplifié de la famille de Poisson (basé sur la valeur du critère d'information d'Akaike) a été retenu pour tester l'effet des classes d'âge sur l'utilisation des organes de l'espèce. Enfin, le même modèle linéaire généralisé de la famille de Poisson a été adopté pour tester la significativité de l'influence des autres utilisations de l'espèce sur ses usages alimentaires. Toutes les analyses ont été effectuées avec le logiciel R version 3.2 (R Core Team, 2016).

Résultats

Utilisations faites de *D. mespiliformis*

Les personnes enquêtées ont confirmé que les organes de l'espèce sont généralement collectés à des fins alimentaires et médicinales, mais aussi comme brosse végétale, fourrage, bois énergie, bois de service et bois d'œuvre. Les résultats de l'analyse de la covariance sur les usages totaux

rapportés (tableau II) ont révélé que les usages de *D. mespiliformis* sont déterminés par l'âge, le sexe et la provenance des catégories socioculturelles ($P < 0,05$). En effet, il s'est révélé que *D. mespiliformis* est majoritairement utilisé par les hommes adultes.

Par ailleurs, la projection simultanée des catégories socioculturelles, de la provenance et des utilisations de l'espèce dans les plans d'axes factoriels (figure 2) a montré que les utilisations comme bois énergie et bois d'œuvre sont plus fréquentes chez les Peuhls de Tchaourou et les Bariba de Sinendé. Cependant, les Bariba de Tchaourou, de Sinendé et les Peuhls de Sinendé ont davantage utilisé *D. mespiliformis* à des fins alimentaires, comme fourrage et en pharmacopée. S'agissant des Peuhls et Wamma de Tchaourou et des Bariba de Bembèrèkè, l'espèce a été plus employée comme brosse végétale et bois de service. Notons que les Nago et les Peuhls de Bembèrèkè ont été moins intéressés par l'espèce. Ces résultats ont été expliqués par 67,64 % des variabilités liées aux usages de *D. mespiliformis* au sein des catégories socioculturelles.

Usages des organes de *D. mespiliformis*

Les organes utilisés de *D. mespiliformis* ont été les fruits, les feuilles, les tiges, les écorces, les racines, les pulpes et les noix. L'importance culturelle de chaque organe de *D. mespiliformis* a varié significativement suivant les facteurs sociodémographiques. En effet, l'analyse de la cova-

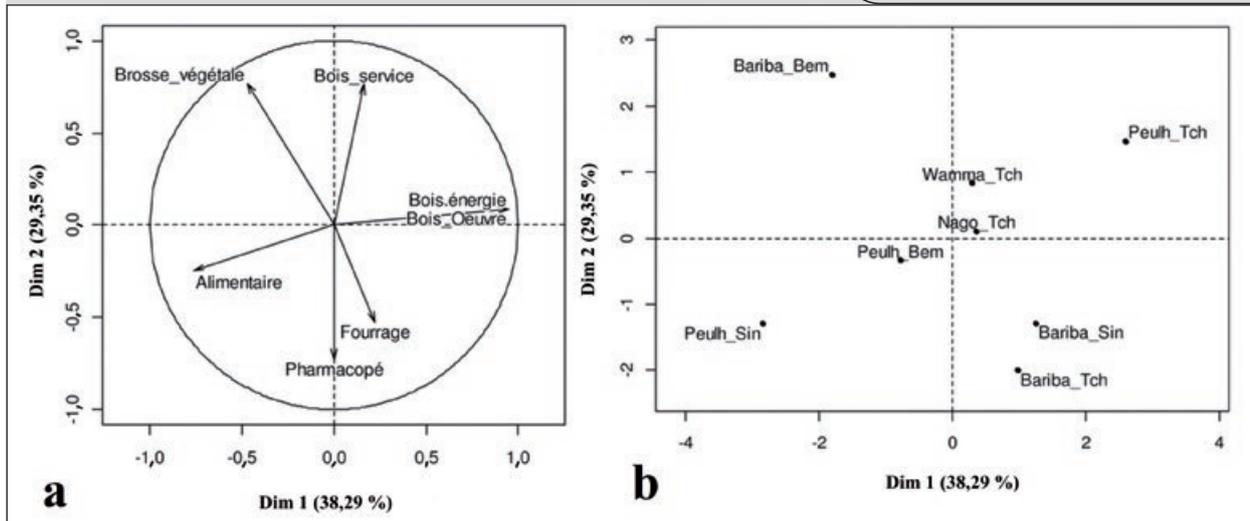


Figure 2. Projection des usages de *Diospyros mespiliformis* (a) et des provenances socioculturelles utilisatrices de *D. mespiliformis* (b) dans le plan d'axe formé par les deux premières composantes principales.

*Projection of *Diospyros mespiliformis* uses (a) and socio-cultural provenances using *D. mespiliformis* (b) in the axis plane formed by the first two principal components.*

Peuhl_Sin = Peuhls de Sinendé ; Bariba_sin = Bariba de Sinendé ; Peuhl_Bem = Peuhls de Bembèrèkè ; Bariba_Bem = Bariba de Bembèrèkè ; Nago_Tch = Nago de Tchaourou ; Wamma_Tch = Wamma de Tchaourou ; Peuhl_Tch = Peuhls de Tchaourou ; Bariba_Tch = Bariba de Tchaourou.

Tableau III

Résultats de l'analyse de la covariance sur les usages totaux rapportés des organes de *Diospyros mespiliformis*.
*Results of the analysis of covariance on the total reported uses of *Diospyros mespiliformis* organs.*

Source de variation	DL	SS	MS	F value
Provenance	3	3,13	1,044	1,05ns
Catégorie socioculturelle	8	6,94	0,867	0,872ns
Sexe	1	3,13	3,125	3,142ns
Profession	4	7,91	1,977	1,987ns
Âge	1	4,97	4,965	4,992*
Provenance × catégorie socioculturelle	1	2,62	2,623	2,637ns
Provenance × sexe	1	1,25	1,247	1,253ns
Catégorie socioculturelle × sexe	3	3,85	1,285	1,291ns
Provenance × profession	6	7,5	1,249	1,256ns
Catégorie socioculturelle × profession	5	7,16	1,431	1,439ns
Sexe × profession	2	0,4	0,198	0,199ns
Provenance × âge	2	1,88	0,939	0,944ns
Catégorie socioculturelle × âge	5	3,7	0,74	0,744ns
Sexe × âge	1	0,06	0,057	0,057ns
Profession × âge	3	3,1	1,032	1,037ns
Provenance × sexe × âge	1	0,01	0,013	0,013ns
Provenance × profession × âge	3	8,68	2,893	2,908*

DL : degré de liberté ; SS : somme des carrés des écarts ; MS : carré moyen ; F value : statistique de Fisher.
 Codes du niveau de significativité : 0,05 = * ; > 0,05 = non significatif (ns).
 X × Y : interaction entre deux variables ;
 X × Y × Z : interaction entre trois variables.

riance a montré que l'âge des enquêtés et les interactions provenance-profession-âge ont déterminé significativement ($P < 0,05$) le niveau d'usage des organes de *D. mespiliformis* par les populations (tableau III). Les racines et les écorces de la plante (photo 4a et b) ont été plus utilisées par toutes les classes d'âge (figure 3). Les racines le sont plus par les vieux suivis des adultes, tandis que le contraire a été obtenu pour les écorces. Cependant, les jeunes sont ceux qui ont le plus utilisé les fruits de l'espèce. Notons que les pulpes, les noix et les tiges le sont très peu dans le milieu d'étude (figure 3).

La projection simultanée de l'usage des organes de la plante et l'interaction provenance-profession-âge dans le plan des axes formés par les deux premières composantes principales (63,67 % de toute la variabilité) sont présentées dans la figure 4. Cette analyse a révélé que les racines, les tiges et les noix de *D. mespiliformis* (figure 4a) sont les organes les plus recherchés par les éleveurs adultes de Bembèrèkè, les jeunes éleveurs de Sinendé, les vieux éleveurs de Tchaourou, les vieux agriculteurs de Tchaourou et les agriculteurs adultes de Tchaourou (figure 4b). Cependant, les écorces, les feuilles et les pulpes (figure 4a) sont, quant à elles, les parties les plus utilisées par les vieux agriculteurs de Bembèrèkè, les jeunes agriculteurs de Bembèrèkè et les commerçants adultes de Bembèrèkè et de Sinendé (figure 4b). Par ailleurs, les fruits et les feuilles (figure 4a)



Photos 4.
Arbres de *Diospyros mespiliformis* dont les organes ont été récoltés :
A) racines ; B) écorce de tronc ; C) branches et feuilles.
*Trees of *Diospyros mespiliformis* from which organs were collected:*
A) roots; B) trunk bark; C) branches and leaves.
Photos B. A. Akakpo.

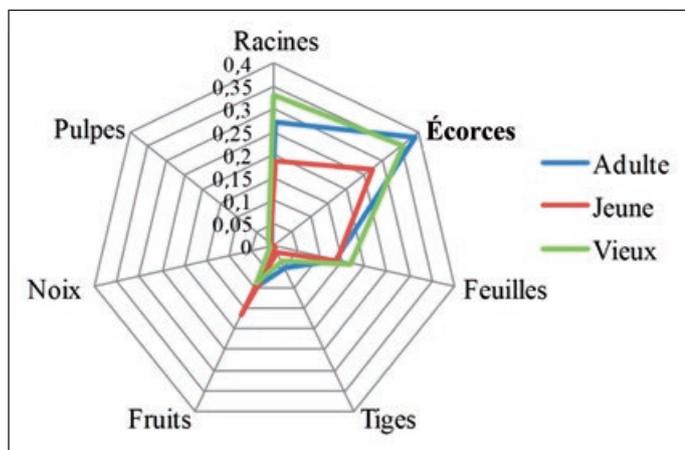


Figure 3.
Diagramme en radar montrant l'importance des organes utilisés de *Diospyros mespiliformis* suivant les classes d'âge.
*Radar diagram showing the importance of the organs used of *Diospyros mespiliformis* according to age classes.*

intéressent davantage les jeunes éleveurs de Tchaourou, les éleveurs adultes de Bembèrèkè et les vieux éleveurs de Sinendé (figure 4b).

Les tiges et les feuilles (figure 5a) sont plus fréquemment utilisées par les adultes et les vieux éleveurs de Tchaourou ainsi que les vieux agriculteurs de Bembèrèkè (figure 5b). Enfin, les fruits, les noix et les écorces (figure 5a) de *D. mespiliformis* ont été à Bembèrèkè préférés par les adultes commerçants et éleveurs, à Sinendé par les adultes commerçants et à Tchaourou par les vieux et les adultes agriculteurs (figure 5b).

Influence des autres utilisations de *D. mespiliformis* sur le niveau d'usage alimentaire

Le résultat de la régression linéaire généralisée de Poisson réalisée sur la matrice des valeurs des usages rapportés par les enquêtés est présenté dans le tableau IV. Les usages de l'espèce tels que le bois (œuvre et énergie) et le fourrage ont eu une influence très significative ($P < 0,000$) et négative sur l'usage alimentaire (fruit et pulpe) de l'espèce. En d'autres termes, les usages de l'espèce comme bois d'œuvre et énergie peuvent entraîner une baisse de sa valorisation en tant que produit alimentaire. En effet, une unité d'usage comme le bois énergie fait baisser la possibilité d'usage alimentaire de 0,86 lorsque les usages en tant que fourrage, bois d'œuvre et pharmacopée sont maintenus constants. Pour l'utilisation en fourrage, une unité de cet usage fait baisser la possibilité d'usage alimentaire de 3,97 lorsque les autres usages sont également restés constants (figure 3). Par contre, aucun impact significatif n'a été relevé en ce qui concerne les utilisations en tant que brosse végétale et bois de service sur la possibilité de l'usage alimentaire de l'espèce ($P > 0,05$). Toutefois, l'usage en pharmacopée traditionnelle n'est pas sans impact négatif sur la possibilité d'utiliser l'espèce en alimentation.

Discussion

Cette étude a montré que *Diospyros mespiliformis* est une espèce à usages multiples dans le Nord du Bénin. Son importance varie aussi suivant les catégories sociodémographiques des localités étudiées. Sept catégories d'usages y ont été rapportées. Il s'agit des usages alimentaires, en pharmacopée, comme bois d'œuvre, bois de service, bois énergie, brosse végétale et fourrage. Ces résultats confirment les travaux de Djagoun *et al.* (2010) et de Vodouhê *et al.* (2009), qui ont recensé pratiquement les mêmes utilisations au Bénin. Cependant, l'évaluation dans cette étude des variabilités des utilisations de l'espèce suivant les facteurs sociodémographiques reste la première de l'espèce au Bénin.

Les différentes utilisations de l'espèce et de ses organes sont déterminées par l'âge, le sexe, la provenance socioculturelle et la profession principale des utilisateurs. Les mêmes observations ont été faites dans plusieurs autres études au Bénin, dont celles de Wédjangnon *et al.* (2016) sur *Mansonina altissima*, de Akouhou *et al.* (2014) sur *Artocarpus altilis* et de Koura *et al.* (2011) sur *Parkia biglobosa*. Dans cette étude, ce sont les hommes adultes qui utilisent le

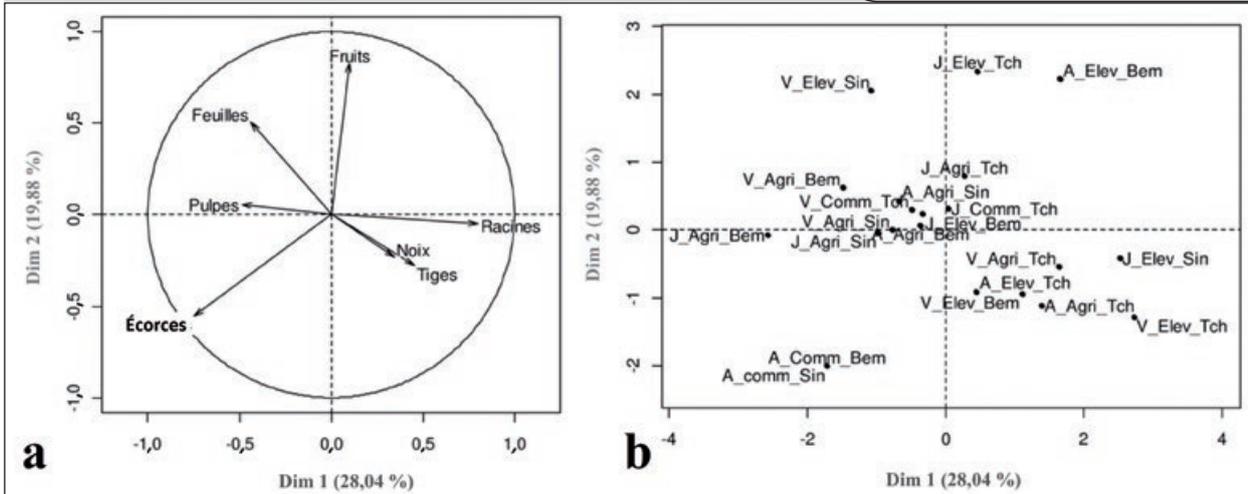


Figure 4.

Projection des organes utilisés de *Diospyros mespiliformis* (a) et de l'interaction âge x provenance x socioculturelle (b) dans le plan d'axe formé par les deux premières composantes principales.

Projection of the used organs of *Diospyros mespiliformis* (a) and the age x provenance x socio-cultural interaction (b) in the axis plane formed by the first two principal components axis plane formed by the first two principal components.

V_Elev_sin = vieil éleveur de Sinandé ; A_Comm_Sin = adulte commerçant de Sinandé ; J_Agri_Sin = jeune agriculteur de Sinandé ; A_Agri_Sin = adulte agriculteur de Sinandé ; V_Agri_Sin = vieil agriculteur de Sinandé ; J_Elev_sin = jeune éleveur de Sinandé ; A_Comm_Bem = adulte commerçant de Bembèrèkè ; J_Agri_Bem = jeune agriculteur de Bembèrèkè ; A_Agri_Bem = adulte agriculteur de Bembèrèkè ; V_Elev_Bem = vieil éleveur de Bembèrèkè ; J_Elev_Bem = jeune éleveur de Bembèrèkè ; A_Elev_Bem = adulte éleveur de Bembèrèkè ; J_Elev_Tch = jeune éleveur de Tchaourou ; A_Elev_Tch = adulte éleveur de Tchaourou ; V_Elev_Tch = vieil éleveur de Tchaourou ; J_Agri_Tch = jeune agriculteur de Tchaourou ; A_Agri_Tch = adulte agriculteur de Tchaourou ; V_Agri_Tch = vieil agriculteur de Tchaourou ; J_Comm_Tch = jeune commerçant de Tchaourou ; V_Comm_Tch = vieux commerçant de Tchaourou.

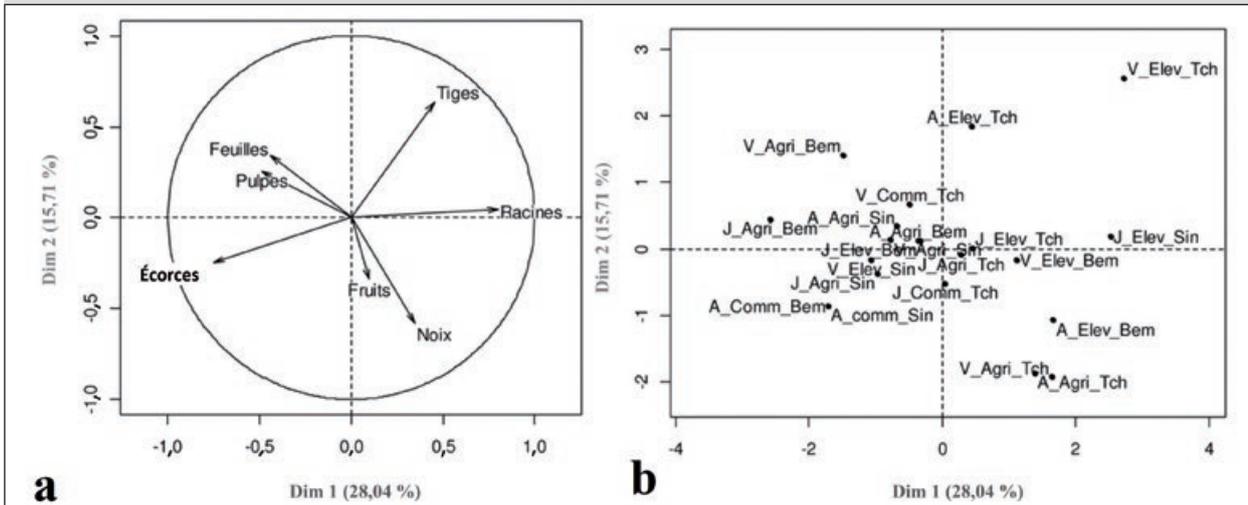


Figure 5.

Projection des organes utilisés de *Diospyros mespiliformis* (a) et de l'interaction âge x provenance x socioculturelle (b) dans le plan d'axe formé par les composantes principales 1 et 3.

Projection of the used organs of *Diospyros mespiliformis* (a) and the age x provenance x socio-cultural interaction (b) in the axis plane formed by the first two principal components axis plane formed by principal components 1 and 3.

V_Elev_sin = vieil éleveur de Sinandé ; A_Comm_Sin = adulte commerçant de Sinandé ; J_Agri_Sin = jeune agriculteur de Sinandé ; A_Agri_Sin = adulte agriculteur de Sinandé ; V_Agri_Sin = vieil agriculteur de Sinandé ; J_Elev_sin = jeune éleveur de Sinandé ; A_Comm_Bem = adulte commerçant de Bembèrèkè ; J_Agri_Bem = jeune agriculteur de Bembèrèkè ; A_Agri_Bem = adulte agriculteur de Bembèrèkè ; V_Elev_Bem = vieil éleveur de Bembèrèkè ; J_Elev_Bem = jeune éleveur de Bembèrèkè ; A_Elev_Bem = adulte éleveur de Bembèrèkè ; J_Elev_Tch = jeune éleveur de Tchaourou ; A_Elev_Tch = adulte éleveur de Tchaourou ; V_Elev_Tch = vieil éleveur de Tchaourou ; J_Agri_Tch = jeune agriculteur de Tchaourou ; A_Agri_Tch = adulte agriculteur de Tchaourou ; V_Agri_Tch = vieil agriculteur de Tchaourou ; J_Comm_Tch = jeune commerçant de Tchaourou ; V_Comm_Tch = vieux commerçant de Tchaourou.

plus l'espèce. Ces résultats peuvent se justifier par l'importance que cette catégorie sociodémographique accorde à la plante (Gbémavo *et al.*, 2014). Cela peut être aussi dû au fait que, dans le milieu d'étude, les utilisations et la récolte des organes de la plante incombent plutôt aux hommes (Issifou *et al.*, 2018) et ceux-ci dans une classe d'âge plus active. En effet, toutes les actions pour une bonne valorisation de

la plante devraient cibler principalement cette couche de la population. Une variation dans les utilisations de l'espèce a été également observée suivant la provenance des catégories socioculturelles. Ce résultat corrobore ceux de Hoffman et Gallaher (2007), qui ont conclu que l'utilisation des ressources forestières, végétales et alimentaires varie d'une culture à une autre ; de ce fait, au sein d'un même

Tableau IV.

Résultat de la régression linéaire généralisée de Poisson sur les usages rapportés indiquant l'impact des catégories d'usages de *Diospyros mespiliformis* sur son utilisation alimentaire.

*Result of the generalized linear Poisson regression on reported uses indicating the impact of the use categories of *Diospyros mespiliformis* on its food use.*

Usages	Estimateur	Std. Error	Z-value
Intercept	- 0,01	0,10	- 0,10ns
Bois énergie	- 0,86	0,18	- 4,82***
Bois d'œuvre	- 1,77	0,25	- 6,96***
Bois de service	- 0,23	0,15	- 1,59ns
Brosse végétale	- 0,15	0,14	- 1,07ns
Fourrage	- 3,97	0,71	- 5,56***
Pharmacopée	- 0,43	0,15	- 2,78**

Std. Error : erreur standard ; Z-value : statistique calculée.
Codes du niveau de significativité : 0,000 = *** ;
0,001 = ** ; 0,01 = * ; > 0,05 = non significatif (ns).

pays, des zones adjacentes peuvent ne pas faire les mêmes usages des ressources. Cette variation qui semblerait non négligeable dans les décisions de valorisation durable de l'espèce pourrait s'expliquer par les différences culturelles entre catégories socioculturelles (Assogba *et al.*, 2017). Cependant, une différenciation dans les usages et organes utilisés a été observée à l'intérieur d'une même catégorie socioculturelle géographiquement séparée. C'est le cas des Peuhls de Tchaourou et de Sinendé qui utilisent respectivement l'espèce comme bois (énergie et œuvre) et à des fins alimentaires. Ce résultat peut s'expliquer par l'émergence de nouvelles connaissances sur l'utilisation de l'espèce en raison de l'adaptation à la situation locale.

La profession des enquêtés influe aussi sur les catégories d'utilisations des organes de la plante. En effet, comme l'ont conclu Byg et Balslev (2004), les connaissances ethnobotaniques sont globalement influencées par les facteurs tels que l'ethnie, l'âge, le sexe, la religion, le niveau d'instruction, la position géographique et la profession de l'enquêté. Ainsi, l'importance des activités principales dans les variations des parties utilisées de *D. mespiliformis* peut être justifiée par l'activité de l'utilisateur. Par conséquent, les agriculteurs et les éleveurs récoltent plutôt les racines et les feuilles de la plante pour renforcer leur santé après les activités intenses de labour ou de pâture. Les tiges et les troncs sont principalement utilisés pour le bois énergie ou le bois d'œuvre par les agriculteurs car ces derniers représentent majoritairement les propriétaires du foncier dans les milieux enquêtés, alors que, chez les commerçants, les fruits, les noix et les pulpes de l'espèce sont activement recherchés ; cela peut aussi révéler le caractère marchand de ces organes de l'espèce. Les agriculteurs et les éleveurs qui les utilisent le font davantage à des fins de consommation circonstancielle.

Les usages comme bois (énergie et œuvre), fourrage et pharmacopée réduisent significativement la possibilité d'usage alimentaire de l'espèce. En effet, le recours à l'espèce en tant que bois (énergie et œuvre) signifie indirectement son élimination (Cunningham, 1996), par coupe ou par dévitalisation. Ce qui impacterait sa disponibilité pour des fins alimentaires et même constitue une menace pour sa valorisation durable. L'émondage de l'espèce pour le fourrage affecte aussi le cycle de reproduction de l'espèce (Gandon, 2003 ; Depommier, 1998) et donc sa potentialité pour des usages alimentaires. En ce qui concerne les usages en pharmacopée, les racines et les écorces de l'espèce sont recherchées par les populations. Ainsi, selon Belem *et al.* (2008) et Betti (2001), la récolte intensive des racines et des écorces des arbres peut entraîner la perte de leur vigueur et des troubles physiologiques. Du coup, la production de fruits est aussi touchée et impacterait directement l'usage de l'espèce à des fins alimentaires.

Implication pour la valorisation et la conservation de *D. mespiliformis*

L'espèce *D. mespiliformis* est principalement exploitée par les hommes adultes à des fins alimentaires, en pharmacopée, comme bois d'œuvre, bois de service, bois énergie, brosse végétale et fourrage dans le milieu d'étude. Des actions de valorisation et de conservation de l'espèce doivent maintenant être menées principalement en direction des hommes adultes des différentes communes considérées dans cette étude. La valorisation de l'espèce pour des usages tels que le bois énergie et le bois d'œuvre doit concerner plus particulièrement les Peuhls de Tchaourou et les Bariba de Sinendé, qu'ils soient agriculteurs ou éleveurs. Cependant, et considérant le fait que ces usages affectent non seulement l'usage alimentaire mais aussi la survie de l'espèce, des études doivent être menées afin de déterminer la productivité et la possibilité d'exploitation de l'espèce dans le milieu d'étude. En outre, des efforts de domestication doivent être déployés pour assurer sa conservation.

Les usages de l'espèce à des fins alimentaires, comme fourrage et en pharmacopée sont plus importants chez les Bariba de Tchaourou, de Sinendé et les Peuhls de Sinendé. Le renforcement des capacités de ces groupes socioculturels pour ces utilisations à travers des pratiques durables de collecte des organes sont nécessaires pour une meilleure conservation de l'espèce. Les racines et les écorces ont été les plus utilisées par toutes les classes d'âge de la population ; ce sont des organes vitaux pour l'espèce dont l'exploitation mettrait en danger sa survie. Il serait intéressant d'étudier la disponibilité des substances actives recherchées dans les racines et écorces, dans les feuilles et fruits, afin d'en créer des substituts. Il est donc maintenant urgent d'élaborer une stratégie de valorisation et de conservation de l'espèce *D. mespiliformis* dans le Nord du Bénin, afin de satisfaire les besoins des différents groupes socioculturels tout en pérennisant la disponibilité et la survie de l'espèce.

Conclusion

De la présente étude, on peut conclure que *Diospyros mespiliformis* Hochst. est utilisée de plusieurs manières par les populations locales du Nord du Bénin. Les utilisations sollicitées de ses différents organes sont diversifiées et dépendent des groupes socioculturels et socioprofessionnels, des âges, des milieux de provenance des enquêtés et de leurs interactions. Les racines et les écorces sont les organes principalement prisés par les adultes et les vieux. Les Peuhls et les Bariba sont les groupes socioculturels qui constituent les principaux utilisateurs des différents organes de l'espèce. À cet effet, les Peuhls éleveurs sollicitent davantage les organes de l'espèce dans l'alimentation et la pharmacopée, tandis que les Bariba les utilisent plus en pharmacopée, comme brosse végétale et comme fourrage. Quant aux Nago et Wamma, ils s'attachent aux parties ligneuses de l'espèce pour le bois (service, énergie et œuvre). La convergence entre les organes les plus utilisés de l'espèce et les groupes professionnels révèle que les éleveurs et agriculteurs préfèrent les parties sensibles (racines et écorces) de l'espèce. La commercialisation de la plante se fait sans préférence particulière des organes. Pour une stratégie de valorisation et de conservation de l'espèce, non seulement ces conclusions sont à prendre en compte mais il faudra aussi évaluer les pressions de prélèvement pour chaque catégorie d'usages et les possibilités de domestication de l'espèce dans les systèmes agroforestiers (photo 5).



Photo 5.
Arbre de *Diospyros mespiliformis* conservé dans un champ.
Tree of *Diospyros mespiliformis* preserved in a field.
Photo A. Daanon.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les populations pour leur disponibilité lors des collectes de données d'enquête et pour leur collaboration pertinente dans l'accomplissement de cette recherche.

Références

- Akouehou G. S., Goussanou C. A., Idohou R., Dissou F. E., Azokpota P., 2014. Importance socioculturelle de *Artocarpus altilis* (Parkinson) Fosberg (Moraceae) au Sud-Bénin. *Journal of Applied Biosciences*, 75 (1) : 6173-6182. <https://doi.org/10.4314/jab.v75i1.5>
- Arbonnier M., 2002. *Trees, shrubs and lianas of West African dry zones*. Versailles, France, Éditions Quæ, 573 p.
- Assogba G. A., Fandohan A. B., Salako V. K., Assogbadjo A. E., 2017. Usages de *Bombax costatum* (Malvaceae) dans les terroirs riverains de la Réserve de biosphère de la Pendjari, République du Bénin. *Bois et Forêts des Tropiques*, 333 : 17-29. <https://doi.org/10.19182/bft2017.333.a31465>
- Assogbadjo A. E., Amadji G., Glèlè Kakaï R., Mama A., Sinsin B., Van Damme P., 2009. Évaluation écologique et ethnobotanique de *Jatropha curcas* L. au Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 3 (5) : 1065-1077. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v3i5.51085>
- Assogbadjo A. E., Glèlè Kakaï R., Chadaré F. J., Thomson L., Kyndt T., Sinsin B., et al., 2008. Folk classification, perception and preferences of baobab products in West Africa: Consequences for species conservation and improvement. *Economic Botany*, 62 (1): 74-84. <https://doi.org/10.1007/s12231-007-9003-6>
- Avocèvou-Ayisso C., Avohou T. H., Oumorou M., Dossou G., Sinsin B., 2012. Ethnobotany of *Pentadesma butyracea* in Benin: A quantitative approach. *Ethnobotany Research and Applications*, 10: 151-166. <http://ethnobotanyjournal.org/index.php/era/article/view/447>
- Belem B., Smith O. C., Theilade I., Bellefontaine R., Guinko S., Lykke A. M., et al., 2008. Identification des arbres hors forêt préférés des populations du Sanmatenga (Burkina Faso). *Bois et Forêts des Tropiques*, 298 (4) : 53-64. <https://revues.cirad.fr/index.php/BFT/article/view/20366>
- Betti J. L., 2001. Vulnérabilité des plantes utilisées comme antipaludiques dans l'arrondissement de Mintom au sud de la réserve de biosphère du Dja (Cameroun). *Systematics and Geography of Plants*, 71 (2) : 661-678. <https://doi.org/10.2307/3668709>
- Bonnet P., Arbonnier M., Grard P., 2008. *Ligneux du Sahel : outil graphique d'identification*. Versailles, France, Éditions Quæ, CD-Rom. <https://agritrop.cirad.fr/545941/>
- Bonou W., Glèlè Kakaï R., Assogbadjo A. E., Fonton H. N., Sinsin B., 2009. Characterization of *Azelia africana* Sm. habitat in the Lama Forest reserve of Benin. *Forest Ecology and Management*, 258 (7): 1084-1092. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.05.032>
- Byg A., Balslev H., 2004. Factors affecting local knowledge of palms in Nangaritza Valley, Southeastern Ecuador. *Journal of Ethnobotany*, 24 (2): 255-278. <https://www.biodiversitylibrary.org/page/32740564#page/91/mode/1up>
- Codjia J. T. C., Assogbadjo A. E., Ekué M., 2003. Diversité et valorisation au niveau local des ressources végétales forestières alimentaires du Bénin. *Cahiers Agricultures*, 12 (5) : 321-331. <https://revues.cirad.fr/index.php/cahiers-agricultures/article/view/30405>
- Cunningham A. B., 1996. *Peuples, parc et plantes. Recommandations pour les zones à usages multiples et les alternatives de développement autour du parc national de Bwindi Impénétrable*, Ouganda. Paris, France, UNESCO, Document de travail Peuples et Plantes n° 4, 64 p. <http://www.ethnopharmacologia.org/prelude2018/pdf/biblio-hc-11-cunningham.pdf>
- Depommier D., 1998. Étude phénologique de *Faidherbia albida*. Effet de l'émondage, du site et de la dimension de l'arbre sur les phénophases de l'espèce au Burkina Faso. In : Campa C., Grignon C., Gueye M., Hamon S. (éds). *L'acacia au Sénégal*. Paris, France, ORSTOM/ISRA, coll. Colloques et séminaires, 159-179. <https://agritrop.cirad.fr/465566/>

- Diarra N., Togola A., Denou A., Willcox M., Daou C., Diallo D., 2016. Étude ethnobotanique des plantes alimentaires utilisées en période de soudure dans les régions Sud du Mali. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 10 (1) : 184-197. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v10i1.14>
- Djagoun C. A. M. S., Glèlè Kakaï R., Konnon D., Sewade C., Kouton M., Bonou W., et al., 2010. Potential Food and Medicinal Use of Plant Resources of the Ouémé Supérieur and N'Dali Classified Forests (Northern Benin). *Fruit, Vegetable and Cereal Science and Biotechnology*, 4 (1): 47-54.
- Dossou-Yovo H. O., Vodouhè F. G., Sinsin B., 2014. Assessment of the medicinal uses of plant species found on termitaria in the Pendjari biosphere reserve in Benin. *Journal of Medicinal Plant Research*, 8 (8): 368-377. <https://doi.org/10.5897/JMPR10.124>
- Ekué M. R., Sinsin B., Eyog-Matig O., Finkeldey R., 2010. Uses, traditional management, perception of variation and preferences in ackee (*Blighia sapida* K.D. Koenig) fruit traits in Benin: implications for domestication and conservation. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 6: 1-12. <https://doi.org/10.1186/1746-4269-6-12>
- Fandohan B., Assogbadjo A. E., Glèlè Kakaï R., Kyndt T., De Caluwé E., Codjia J. T. C., Sinsin B., 2010. Women's traditional knowledge, use value, and the contribution of tamarind (*Tamarindus indica* L.) to rural households' cash income in Benin. *Economic Botany*, 64: 248-259. <https://doi.org/10.1007/s12231-010-9123-2>
- Gandon B., 2003. L'émondage du *Pterocarpus erinaceus* (vène) : étude des pratiques et de leurs impacts sur l'arbre, sur 4 terroirs agro-sylvo-pastoraux du Sénégal Oriental. Mémoire DESS, Université de Paris-Val-de-Marne, France, 80 p. <https://agritrop.cirad.fr/528431/>
- Gbémavo C. J., Gnanglé C. P., Assogbadjo E. A., Glèlè Kakaï R. L., 2014. Analyse des perceptions locales et des facteurs déterminant l'utilisation des organes et des produits du *Jatropha curcas* Linn. (Euphorbiaceae) au Bénin. *Agronomie Africaine*, 26 (1) : 69-79. <https://www.ajol.info/index.php/aga/article/view/104853>
- Gnonlonfoun I., Glèlè Kakaï R. L., Salako V. K., Assogbadjo A. E., Ouédraogo A., 2015. Structural analysis of regeneration in tropical dense forest: combined effect of plot and spatial distribution patterns. *Acta Botanica Gallica: Botany Letters*, 162 (1): 79-87.
- 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/10.1080/12538078.2014.984332>
- Hoffman B., Gallaher T., 2007. Importance indices in ethnobotany. *Ethnobotany Research and Applications*, 5 (1): 201-218. <http://ethnobotanyjournal.org/index.php/era/article/view/130>
- Houehanou T. D., Assogbadjo A. E., Kakaï R. G., Houinato M., Sinsin B., 2011. Valuation of local preferred uses and traditional ecological knowledge in relation to three multipurpose tree species in Benin (West Africa). *Forest Policy and Economics*, 13 (7): 554-562. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2011.05.013>
- Idohou R., Assogbadjo A. E., Fandohan B., Gouwakinnou G. N., Glèlè Kakaï R. L., Sinsin B., et al., 2013. National inventory and prioritization of crop wild relatives: case study for Benin. *Genetical Resources and Crop Evolution*, 60 (4): 1337-1352. <https://doi.org/10.1007/s10722-012-9923-6>
- INSAE, 2016. Effectifs de la population des villages et quartiers de villes du Bénin. Rapport final, RGPH-Recensement Général de la Population et l'Habitat 4^e édition. Cotonou, Bénin, Institut national de la statistique et de l'analyse économique, 85 p.
- IUCN (International Union of Conservation of Nature), 2014. IUCN Evaluations of Nominations of Natural and Mixed Properties to the World Heritage List. Report to the World Heritage Committee Twenty-Sixth Session, 24-29 June 2002, Budapest, Hungary. UNESCO, World Heritage Convention, 148 p. <https://whc.unesco.org/archive/2014/whc14-38com-inf8B2-en.pdf>
- Issifou I. S., Kpérkouma W. A., Dourma M., Atakpama W., Kanda M., Akpagana K., 2018. Valeur ethnobotanique de l'espèce *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. (meliaceae) auprès des populations riveraines de la chaîne de l'Atacora au Togo. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 6 (1) : 64-72. https://www.agrimaroc.org/index.php/Actes_IAPH2/article/view/512/570
- Koura K., Ganglo J. C., Assogbadjo A. E., Agbangla C., 2011. Ethnic differences in use values and use patterns of *Parkia biglobosa* in Northern Benin. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 7 (42): 1-12. <https://doi.org/10.1186/1746-4269-7-42>
- Lougbegnon T. O., Nassi K. M., Gbesso G. F., 2015. Ethnobotanique quantitative de l'usage de *Chrysophyllum albidum* G. Don par les populations locales au Bénin. *Journal of Applied Biosciences*, 95 : 9028-9038. <https://doi.org/10.4314/jab.v95i1.12>
- Mapongmetsem P. M., Kapchie V. N., Tefempa B. H., 2012. Diversity of local fruit trees and their contribution in sustaining the rural livelihood in the Northern Cameroon. *Ethiopian Journal of Environmental Studies and Management*, 5 (1): 32-46. <https://doi.org/10.4314/ejesm.v5i1.5>
- Maxted N., Kell S. P., Ford-Lloyd B., 2008. Crop wild relatives: catalogues, threats, conservation and use. In: Maxted N., Dulloo E., Ford-Lloyd B., Kell S. P., Iriondo J. M. (eds). *Crop Wild Relatives Conservation and Use*. Wallingford, United Kingdom, CAB International, 3-30.
- R Core Team, 2016. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria, R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Vodouhè F. G., Coulibaly O., Greene C., Sinsin B., 2009. Estimating the local value of non-timber forest products to Pendjari biosphere reserve dwellers in Benin. *Economic Botany*, 63 (4): 397-412. <https://doi.org/10.1007/s12231-009-9102-7>
- Wédjangnon A. A., Houèthégnon T., Ouinsavi C., 2016. Caractéristiques ethnobotaniques et importance socio-culturelle de *Mansonia altissima* A. Chev. au Bénin, Afrique de l'Ouest. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 29 (3) : 4678-4690. <http://www.m.elewa.org/IAPS/2016/29.3/4.Wedjangnon.pdf>

Daanon et al. – Contribution des auteurs

Rôle du contributeur	Noms des auteurs
Conceptualisation	A. Daanon, M. Houinato
Gestion des données	A. Daanon, E. A. Padonou, B. A. Akakpo
Analyse formelle	A. Daanon, E. A. Padonou, B. A. Akakpo
Acquisition du financement	A. Daanon
Enquête et investigation	A. Daanon, B. A. Akakpo
Méthodologie	M. Houinato, E. A. Padonou
Gestion de projet	E. A. Padonou, B. A. Akakpo
Ressources	E. A. Padonou, A. Daanon
Logiciels	E. A. Padonou, A. Daanon, B. A. Akakpo
Supervision	E. A. Padonou, M. Houinato
Validation	E. A. Padonou, B. A. Akakpo, A. Daanon, M. Houinato
Visualisation	B. A. Akakpo, E. A. Padonou
Écriture – Préparation de l'ébauche originale	B. A. Akakpo, E. A. Padonou, A. Daanon

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

Caractérisation et variabilité des propriétés physiques et structurelles du bois du kevazingo, *Guibourtia tessmannii*, et de l'okoumé, *Aucoumea klaineana*, provenant des forêts naturelles du Gabon



Photo 1.
Écorce d'okoumé, *Aucoumea klaineana*.
Okoumé bark, *Aucoumea klaineana*.
Photos C. Doumenge.

Jean-Léon ZUE ONDO¹
Julien RUELLE¹
Jana DLOUHÁ¹
Meriem FOURNIER¹

¹ INRAE
UMR Silva
54280 Champenoux
France

Auteur correspondant /
Corresponding author:
Jean-Léon ZUE ONDO –
jean-leon.zue-ondo@inrae.fr
jean-leon.zue-ondo@outlook.com

Doi : 10.19182/bft2021.347.a31939 – Droit d'auteur © 2021, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 16 juin 2020 ;
date d'acceptation : 16 décembre 2020 ; date de publication : 25 février 2021.



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

Citer l'article / To cite the article

Zue Ondo J.-L., Ruelle J., Dlouha J., Fournier M., 2021. Caractérisation et variabilité des propriétés physiques et structurelles du bois du kevazingo, *Guibourtia tessmannii*, et de l'okoumé, *Aucoumea klaineana*, provenant des forêts naturelles du Gabon. Bois et Forêts des Tropiques, 347 : 41-57. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2021.347.a31939>

RÉSUMÉ

Caractérisation et variabilité des propriétés physiques et structurales du bois du kevazingo, *Guibourtia tessmannii*, et de l'okoumé, *Aucoumea klaineana*, provenant des forêts naturelles du Gabon

La caractérisation et l'analyse de la variabilité des paramètres structuraux et des propriétés physiques du bois ont été réalisées chez le kevazingo (*Guibourtia tessmannii*) et l'okoumé (*Aucoumea klaineana*), deux espèces gabonaises à forte valeur économique. En parallèle aux caractéristiques technologiques telles que le retrait ou le point de saturation des fibres, une caractérisation fine de la structure du bois (angle des microfibrilles, angle du fil, microdensité) a été réalisée. Chez les deux espèces, les valeurs moyennes observées pour chaque propriété ont été comparées aux valeurs de la littérature. L'analyse de la variabilité des différentes propriétés permet d'identifier la position radiale (effet de la distance à la moelle) comme principale source de variabilité des propriétés du bois chez le kevazingo, alors que pour l'okoumé la variabilité des propriétés provient non seulement de la distance à la moelle mais aussi de la variabilité entre les rayons (barreaux issus du même arbre) et entre les arbres.

Mots-clés : propriétés physiques du bois, structure du bois, variabilité, espèces tropicales, *Guibourtia tessmannii*, *Aucoumea klaineana*, Gabon.

ABSTRACT

Characterisation and variability of physical and structural properties of Kevazingo, *Guibourtia tessmannii*, and Okoumé, *Aucoumea klaineana*, wood from natural forests in Gabon

This study characterised and analysed the structural parameters and physical properties of wood from Kevazingo (*Guibourtia tessmannii*) and Okoumé (*Aucoumea klaineana*), two high-value species found in Gabon. In parallel with technological characteristics such as shrinkage and the saturation point of the wood fibres, the study produced a detailed characterisation of the wood structure (microfibril angle, grain angle, microdensity). In both species, the average values observed for each property were compared with values in the literature. Analysis of the variability of the different properties identified radial position (effect of distance from the pith) as the main source of variability of wood properties in Kevazingo wood, while in Okoumé wood, the variability of properties results not only from distance from the pith, but also from variability between radial position (wood rods from the same tree) and between trees.

Keywords: physical wood properties, wood structure, variability, tropical species, *Guibourtia tessmannii*, *Aucoumea klaineana*, Gabon.

RESUMEN

Caracterización y variabilidad de las propiedades físicas y estructurales de la madera de bubinga (*Guibourtia tessmannii*) y de ocume (*Aucoumea klaineana*) provenientes de los bosques naturales de Gabón

Se caracterizaron y analizaron la variabilidad de los parámetros estructurales y las propiedades físicas de la madera en dos especies gabonesas de alto valor económico: bubinga (*Guibourtia tessmannii*) y ocume (*Aucoumea klaineana*). Paralelamente a las características tecnológicas como la contracción o el punto de saturación de las fibras, se llevó a cabo una caracterización fina de la estructura de la madera (ángulo de las microfibrillas, ángulo de fibra, microdensidad...). Para ambas especies, los valores medios observados de cada propiedad se compararon con los valores de la literatura. El análisis de la variabilidad de las diferentes propiedades permite identificar la posición radial (efecto de la distancia a la médula) como la principal fuente de variabilidad de las propiedades de la madera en la bubinga, mientras que para el ocume la variabilidad de las propiedades es causada no solo por la distancia a la médula, sino también por la variabilidad entre los radios (varillas provenientes del mismo árbol) y entre distintos árboles.

Palabras clave: propiedades físicas de la madera, estructura de la madera, variabilidad, especies tropicales, *Guibourtia tessmannii*, *Aucoumea klaineana*, Gabón.

Introduction

Le kevazingo, *Guibourtia tessmannii*, et l'okoumé, *Aucoumea klaineana*, sont deux espèces à forte valeur économique originaires des forêts tropicales du Gabon. Reconnues pour la qualité exceptionnelle de leurs grumes (rectitude, dimensions), ces deux espèces fournissent un volume considérable de bois pour l'industrie locale et les marchés internationaux. L'okoumé participe à lui seul à environ 50 % du volume de bois transformé et exporté au Gabon (Medzegue, 2007) et le kevazingo pour environ 21 % (Tosso *et al.*, 2015 ; CITES, 2016). La diversification de la filière bois au Gabon repose en grande partie sur la réussite en deuxième et troisième transformations de ces deux espèces. Toutefois, celles-ci ne bénéficient que de très peu de connaissances sur les caractéristiques intrinsèques de leur bois. Les propriétés technologiques et chimiques de base, telles que la densité moyenne, les retraits dimensionnels, la résistance en compression, le pourcentage de lignine, de cellulose ou encore la composition en extractibles, ont été bien étudiées chez ces deux espèces (Medzegue, 2007 ; Tropix 7-CIRAD, 2012a, 2012b ; Tosso *et al.*, 2015 ; Gérard *et al.*, 2017 ; Pambou Nziengui *et al.*, 2018 ; Ngwa Obame *et al.*, 2019 ; Engozogho *et al.*, 2020 ; Bédounguindzi, 2020). Cependant, les sources de variabilité de ces propriétés, telles que la transition bois juvénile-bois mature (Zobel et Sprague, 1998a, 1998b ; Koubaa *et al.*, 2005) ou la variabilité inter- et intraspécifique, demeurent méconnues. De plus, les paramètres de structure tels que l'angle des microfibrilles de cellulose (AMF) et l'angle du fil, qui sont des indices étroitement liés à de nombreuses propriétés physiques et mécaniques comme le retrait au séchage ou la résistance en compression (Senft et Bendtsen, 1985 ; Guilley *et al.*, 1999 ; Cabrolier *et al.*,

2009 ; Cabrolier, 2012 ; Moore *et al.*, 2014), n'ont fait l'objet d'aucune étude. Par ailleurs, caractériser la variabilité des propriétés de ces deux espèces peut s'avérer déterminant pour une valorisation optimale de leur bois, par l'amélioration de la production ligneuse au travers des pratiques de sélection, avant ou après abattage en forêt et au cours des opérations de transformation.

Dans cet article, nous nous proposons d'étudier les sources de variabilité des propriétés du bois du kevazingo et de l'okoumé. Dans une première approche, nous comparons les résultats obtenus avec des valeurs moyennes de leurs propriétés issues de la littérature. Ensuite, nous analysons la variabilité due à trois facteurs : « l'effet arbre » (variabilité individuelle), « l'effet rayon » (variabilité intra-individuelle entre les deux rayons prélevés au sein du même arbre) et la « distance à la moelle » (variabilité intra-individuelle liée à l'âge cambial).

Matériel et méthodes

Matériel végétal et site d'échantillonnage

Les deux essences étudiées proviennent des forêts tropicales du Gabon. Le kevazingo, *Guibourtia tessmannii*, est une espèce à croissance lente, qui croît en sous-bois dans les premières phases de son développement pour devenir émergente une fois adulte (héli-tolérante) (Meunier *et al.*, 2015). L'okoumé, *Aucoumea klaineana*, est une espèce pionnière, à tempérament héliophile à croissance rapide (Fuhr *et al.*, 2001 ; Meunier *et al.*, 2015). Des arbres ne présentant aucun signe de maladie ou d'attaque d'insecte ont été prélevés. Pour le kevazingo, les individus provenaient des forêts naturelles de la région de Mitzic au nord du Gabon, région



Photos 1.

Okoumé, *Aucoumea klaineana*, l'arbre, l'aubier et l'écorce.
Okoumé, *Aucoumea klaineana*, the tree, the sapwood and the bark.
Photos C. Doumenge.

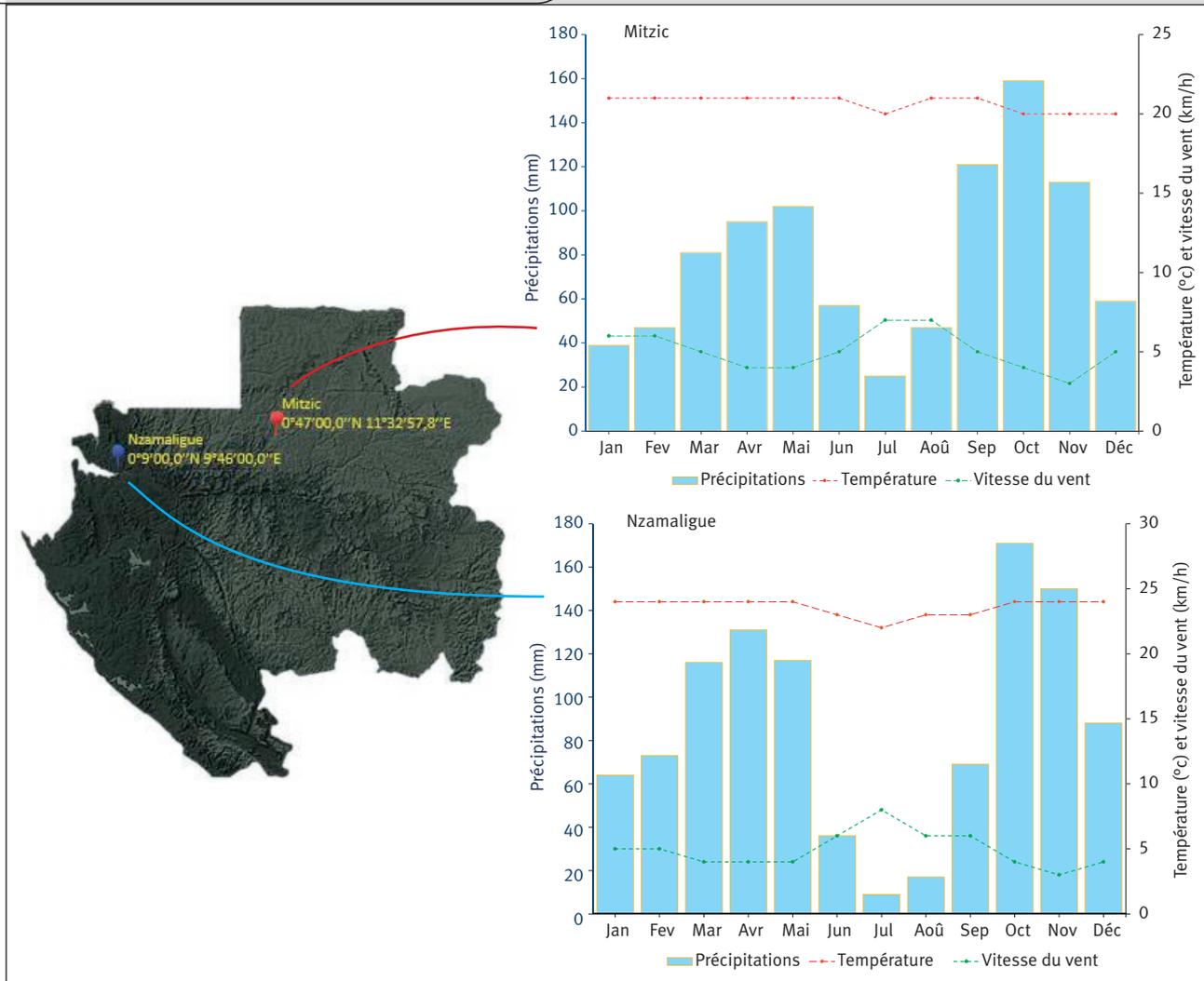


Figure 1.
Localisation géographique des deux sites d'échantillonnage et paramètres climatiques de chaque site.
Geographical location of the two sampling sites and climatic parameters of each site.

dont les caractéristiques physiques du milieu sont les suivantes : climat de savane, précipitations mensuelles variant de 25 mm à 160 mm, températures mensuelles moyennes très peu variables (entre 20 à 21 °C) et vitesse du vent faible (moyennes mensuelles entre 3 et 7 km/h (figure 1). Pour l'okoumé, les individus ont été prélevés en forêt naturelle au nord-ouest du Gabon dans la région de Nzamaligüe qui présente un climat de savane, avec des précipitations mensuelles variant de 9 à 170 mm, une température mensuelle moyenne inférieure à 25 °C et une vitesse du vent faible (moyennes mensuelles entre 5 à 12 km/h).

Nombre d'arbres et paramètres dendrométriques étudiés

Les diamètres moyens des arbres de notre échantillonnage étaient de $78 \pm 4,9$ cm pour le kevasingo et de $78,5 \pm 5,5$ cm pour l'okoumé. Les difficultés de prélèvement d'arbres en forêt tropicale n'ont toutefois pas permis d'obtenir un grand nombre d'individus par essence étudiée. Cinq arbres pour le kevasingo ont été prélevés et quatre arbres pour l'okoumé.

Préparation d'échantillons

Pour chaque arbre, une rondelle de 5 cm d'épaisseur a été prélevée à une hauteur de 1,30 m. Deux barreaux radiaux ont été prélevés dans chaque rondelle, de la moelle vers l'écorce, et ont été utilisés pour la préparation des différents échantillons, destinés à la mesure des caractéristiques du bois (figure 2). Les principales propriétés mesurées sont : la masse volumique, qui par souci de simplification dans la présentation des résultats de ce travail sera nommée densité à l'échelle du cerne (DMoy) ; l'angle des microfibrilles de cellulose (AMF) ; l'angle du fil (GA) ; le retrait radial (Rr) ; le retrait tangentiel (Rt) ; le retrait longitudinal (Rl) ; le retrait volumique (Rv) et le point de saturation des fibres (PSF). Le tableau I renseigne le nombre d'éprouvettes et de mesures réalisées.

Mesure de la densité à l'échelle du cerne

Les mesures de densité à l'échelle du cerne ont été réalisées par microdensitométrie à rayons X (Polge, 1966). Deux barrettes radiales de 2 mm d'épaisseur, diamétrales-

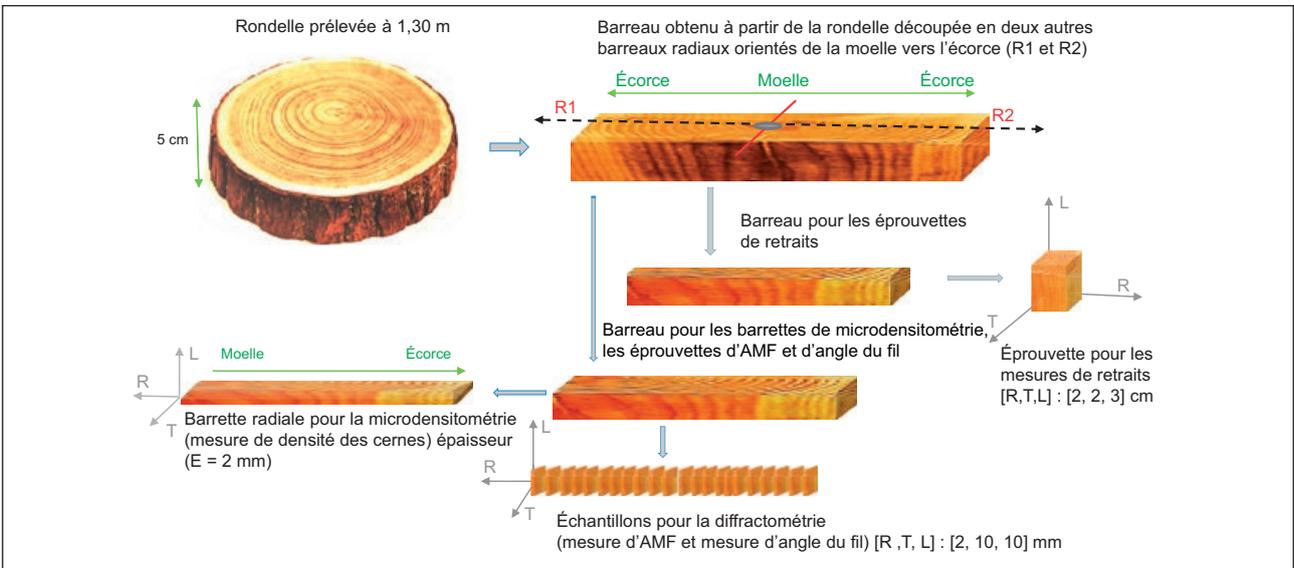


Figure 2.
 Schéma de débit des éprouvettes.
 Sampling flow diagram.

ment opposées, stabilisées à environ 10 % d'humidité, ont été scannées au microtomographe dans lequel elles sont exposées à un rayonnement X. Cette étape a permis l'acquisition d'images radiographiques de chaque barrette. Les profils d'image ont été ensuite analysés grâce au programme CERD (Mothe *et al.*, 1998) qui permet de délimiter les cernes et d'en calculer les valeurs de densité. Chez le kevazingo et l'okoumé, nous n'avons pas pu observer distinctement les cernes sur les images radiographiques, certainement à cause de la croissance continue des arbres en forêt tropicale qui conduit parfois à la formation de plusieurs cernes pour une même année. Pour pallier cela, nous avons donc décidé de tracer de faux-cernes d'une largeur constante arbitraire de 3 mm, nous permettant d'observer les variations radiales de

densité qui peuvent être mises en relation avec les autres propriétés mesurées. Les résultats de ces mesures seront nommés densité, par souci de simplification, dans la suite du manuscrit malgré leur expression en kg/m³.

Mesure de l'angle des microfibrilles (AMF)

Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un diffractomètre « Oxford Diffraction Super Nova ». Des barrettes radiales ont été découpées de la moelle vers l'écorce avec un pas constant (2 mm), en échantillons de dimensions 2 x 10 x 10 mm³ (RTL). Chaque échantillon a été ensuite passé au diffractomètre, où un faisceau de rayons X (rayons X Cu-K α , longueur d'onde $\lambda = 1,542 \text{ \AA}$, diamètre du faisceau 300 μm) est envoyé sur la

Tableau I.

Nombre d'éprouvettes et de mesures réalisées pour chaque arbre pour les bois de kevazingo et d'okoumé.
Number of specimens and measurements taken for each tree for Kevazingo and Okoumé wood.

Espèce	Arbre	Rayon	Microdensitométrie : mesure de densité dans le cerne (DMoy)		Diffractométries : mesure d'angle des microfibrilles de cellulose (AMF)		Analyse d'image : mesure de l'angle du fil		Mesure des retraits : radial (Rr), tangentiel (Rt), longitudinal (Rl), volumique (Rv)	
			Mesure Barrette 1	Mesure Barrette 2	Éprouvette Rayon 1	Éprouvette Rayon 2	Éprouvette Rayon 1	Éprouvette Rayon 2	Éprouvette Rayon 1	Éprouvette Rayon 2
Kevazingo	KV3	2	103	104	125	153	123	146	19	21
	KV4	1	129	NA	158	NA	200	NA	26	NA
	KV5	2	150	119	166	102	248	103	23	22
	KV6	2	160	197	121	168	255	214	22	23
	KV7	2	170	165	165	78	143	145	18	17
Okoumé	OKM1	2	226	167	206	108	212	212	18	17
	OKM2	2	121	113	104	106	99	119	16	15
	OKM3	2	117	106	281	214	152	154	16	16
	OKM4	2	91	84	92	73	81	82	16	16

NA = données manquantes ; NA = *missing data*.

face tangentielle de l'échantillon. Les résultats sont enregistrés sous forme de diffractogrammes qui traduisent graphiquement des pics de diffraction. L'AMF est corrélé à la largeur du pic de diffraction du plan 002 de la cellulose selon la formule de Cave (Cave, 1966) :

$$AMF = 0,6T \text{ (équation 1)}$$

où T est la demi-largeur du pic de diffraction.

Mesure de l'angle du fil

L'angle du fil a été déterminé à partir des échantillons qui ont servi pour la mesure d'AMF. Ces échantillons ont été scannés à l'aide d'un scanner optique (EPSON V750 PRO) et les images obtenues ont été ensuite analysées à l'aide du logiciel ImageJ. Celui-ci permet d'obtenir des mesures d'angle à partir des images de la face tangentielle des échantillons. L'angle du fil est obtenu en mesurant l'inclinaison entre les éléments longitudinaux du bois (fibres, vaisseaux ou trachéides) et la direction axiale. Une seule mesure a été faite par échantillon.

Mesures des retraits et estimation du point de saturation des fibres (PSF)

Les barreaux radiaux prélevés dans les rondelles ont été initialement séchés à l'air. Ensuite, ils ont été découpés en éprouvettes de dimensions 2 x 2 x 3 cm³ (RTL). Ces éprouvettes ont été d'abord saturées en eau puis stabilisées successivement, pendant plusieurs semaines, dans trois ambiances hygrométriques différentes : stabilisation à 18 % (température : 28 °C ± 2 °C ; Rh (humidité relative) : 86 %

± 10 %), puis à 10 % (température : 25 °C ± 2 °C ; Rh : 55 % ± 5 %) et enfin à l'état anhydre atteint après 72 h de séchage à 103 °C. Pour chaque palier de stabilisation, chaque éprouvette a été mesurée dans ses trois directions (D), radiale (r), tangentielle (t) et longitudinale (l), à l'aide d'un pied à coulisse numérique (IP67 Mitutoyo 200 mm) et pesée. Le retrait linéaire (R, en %) a été calculé selon la formule suivante :

$$Rx = (Dx \text{ saturée} - Dx \text{ anhydre}) / Dx \text{ saturée} \times 100 \text{ (équation 2)}$$

où x indique la direction mesurée.

Le retrait volumique a été calculé comme suit :

$$Rv = ((Dr \times Dt \times Dl \text{ saturée}) - (Dr \times Dt \times Dl \text{ anhydre})) / (Dr \times Dt \times Dl \text{ saturée}) \times 100 \text{ (équation 3)}$$

où Dr est la direction radiale, Dt est la direction tangentielle, Dl est la direction longitudinale.

Le point de saturation des fibres (PSF), correspondant à l'humidité théorique en dessous de laquelle le bois commence à se rétracter au cours du séchage, a été déterminé. Il est égal à l'abscisse à l'origine de la droite de régression du retrait volumique en fonction de l'état hygroscopique de l'échantillon.

Analyse statistique

Une analyse descriptive (moyenne et écart-type) a d'abord été effectuée, afin de déterminer les variations moyennes des propriétés du bois des deux espèces. Le package « skimr » (Waring *et al.*, 2020) du logiciel R (R Core Team, 2018) a été utilisé pour générer l'ensemble des résultats de cette analyse. Dans un second temps, un examen de la variabilité de ces propriétés a été réalisé en suivant deux approches :

- Une première approche consistait à examiner la part de variabilité due à trois facteurs : « l'effet arbre » (variabilité individuelle), « l'effet rayon » (variabilité intra-individuelle entre les deux rayons prélevés au sein du même arbre) et la « distance à la moelle » (variabilité intra-individuelle liée à l'âge cambial). Pour cela, un modèle d'analyse de covariance de la forme : propriété = arbre + rayon + distance à la moelle a été utilisé. Nos données ne respectant pas suffisamment les conditions d'application d'une analyse de covariance classique, un test de permutation a donc été appliqué à ce modèle. Le package « lmPerm » (Wheeler et Torchiano, 2016) du logiciel R (R Core Team, 2018) a été utilisé pour réaliser le test de permutation.
- Une seconde approche consistait à déceler le facteur de variabilité prédominant. Pour cela, la variance totale du modèle a été partitionnée en pourcentage de variation expliquée par chaque facteur. Les résultats ont permis ainsi d'identifier le facteur qui rend compte de la plus grande part de variabilité de chaque propriété.

Résultats

Valeurs moyennes des propriétés physiques et des paramètres structuraux du bois des deux espèces

Le tableau II donne les valeurs moyennes des propriétés du bois chez le kevazingo et l'okoumé. Ces valeurs moyennes ont été comparées aux valeurs observées dans la littérature pour ces deux espèces.

Densité moyenne des cernes

Les valeurs de densité moyenne à l'échelle du cerne sont comparables à celles de la densité à 12 % d'humidité présentées dans la littérature des deux espèces (Gérard *et al.*, 1998 ; Medzegue, 2007 ; Tropix 7-Cirad, 2012a, 2012b). Le bois d'okoumé est assez léger, avec une masse volumique inférieure à 650 kg/m³, et celui du kevazingo est mi-lourd à lourd (650 à 950 kg/m³) (figure 3).

Retraits et point de saturation des fibres (PSF)

La figure 3 présente les classements des retraits radial et tangentiel (classement des retraits linéaires). Nos résultats sont comparés ici à ceux de la littérature (Gérard *et al.*, 1998 ; Medzegue, 2007 ; Tropix 7-Cirad, 2012a, 2012b). Le retrait radial est de l'ordre des retraits moyens (3,8 % < Rr < 6,5 %) pour les deux espèces. Le retrait tangentiel est faible chez le kevazingo (RT < 6,5 %) et moyen chez l'okoumé (6,5 % < Rt < 10 %). Le PSF est faible pour le kevazingo (PSF < 25 %) et moyen chez l'okoumé (25 % < PSF < 35 %).

Angle des microfibrilles (AMF)

Jusqu'à présent, l'AMF chez le kevazingo (*G. tessmannii*) et l'okoumé (*A. klaineana*) n'avait encore fait l'objet d'aucune étude. Les variations de cette caractéristique chez ces deux espèces sont comparées à celles d'autres espèces tropicales (Ruelle, 2006 ; Dlouhá, 2009) (figure 4). Chez le kevazingo, l'AMF est de 14 ± 4,8° et chez l'okoumé de 18,1 ± 3,4°. L'examen des variations entre espèces, présentées sur la figure 4, montre un gradient qui semble être lié au tempérament (besoins en lumière). Les espèces héliophiles telles que *A. klaineana* (okoumé) ont des valeurs moyennes plus élevées que celles qui sont hémitolérantes comme *G. tessmannii* (kevazingo). Les autres espèces qui ont un tempérament plus sciaphile présentent les plus faibles valeurs moyennes d'AMF.

Angle du fil

Chez le kevazingo, on trouve des fortes valeurs de l'angle du fil près de la moelle, avec de légères variations d'amplitude qui traduisent un fil en spirale sans périodicité bien marquée. Chez l'okoumé, les variations augmentent fortement de la moelle à l'écorce de manière sinusoïdale, caractérisant la présence d'un contrefil (figure 5). Ces résultats ont été observés pour l'ensemble des arbres des deux espèces.

Tableau II.

Valeurs moyennes des propriétés du bois du kevazingo et de l'okoumé. Les valeurs entre parenthèses représentent les écarts-types.

Average values of the wood properties of Kevazingo and Okoumé. Values in brackets represent standard deviations.

Espèce	Valeurs moyennes des propriétés							
	DMoy (kg/m ³)	AMF (°)	GA (°)	Rr (%)	Rt (%)	RI (%)	Rv (%)	PSF (%)
Kevazingo	868 (95)	14 (4,80)	9,37 (6,07)	4,46 (0,87)	5,85 (1,10)	0,42 (0,14)	10,70 (1,90)	23,80 (1,56)
Okoumé	475 (60)	18 (3,40)	11,30 (7,44)	4,18 (0,54)	6,07 (0,97)	0,46 (0,27)	10,70 (1,37)	29,60 (4,95)

DMoy (densité moyenne des cernes) ; AMF (angle des microfibrilles de cellulose) ; PSF (point de saturation des fibres) ; GA (angle du fil) ; Rr (retrait radial) ; Rt (retrait tangentiel) ; RI (retrait longitudinal) ; Rv (retrait volumique).

DMoy (mean ring density); AMF (angle of the cellulose microfibrils); PSF (fibre saturation point); GA (grain angle); Rr (radial shrinkage); Rt (tangential shrinkage); RI (longitudinal shrinkage); Rv (volume shrinkage).

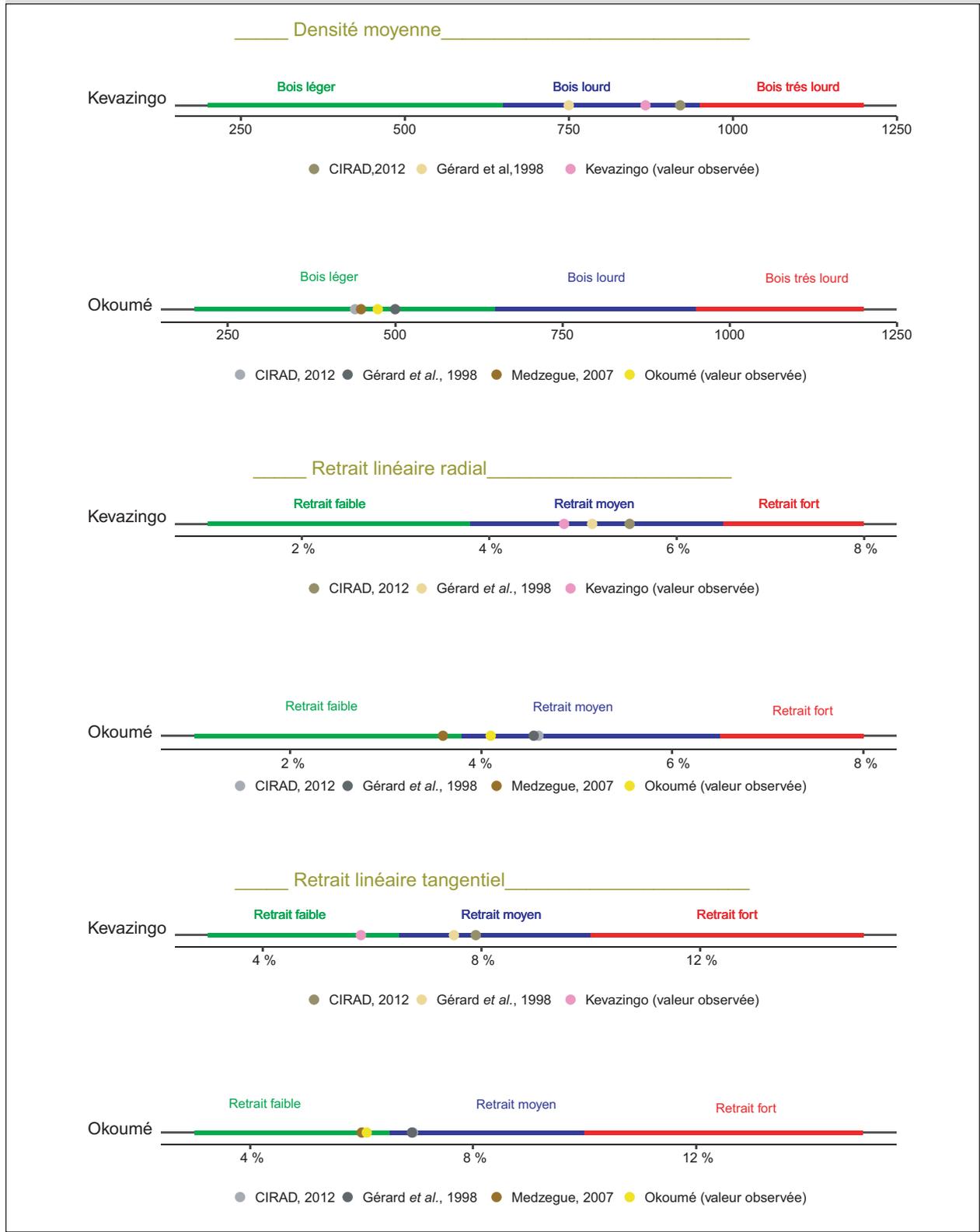


Figure 3. Classe de densité du bois à 12 % d'humidité et du retrait linéaire radial et tangentiel (Gérard *et al.*, 1998). Les valeurs moyennes du kevazingo et de l'okoumé sont comparées aux valeurs de référence de la littérature. *Wood density class at 12% moisture content and linear radial and tangential shrinkage (Gérard et al., 1998). The mean values of Kevazingo and Okoumé are compared with reference values in the literature.*

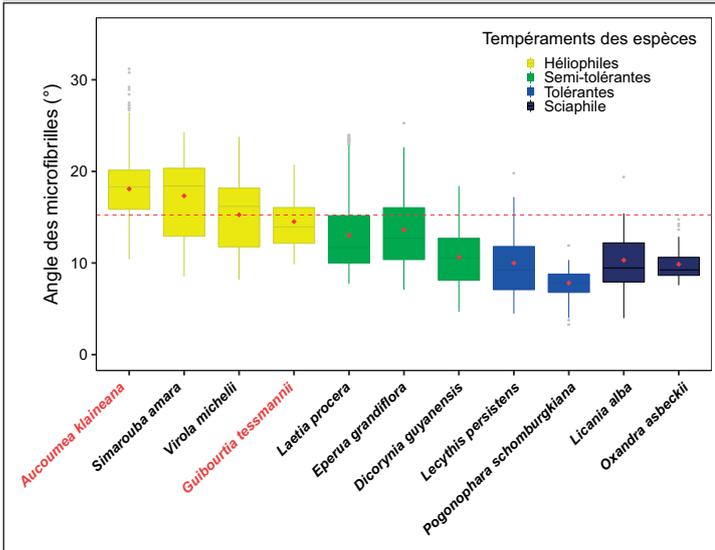


Figure 4.

Variation de l'AMF du kevazingo (*G. tessmannii*), de l'okoumé (*A. klaineana*) et de quelques espèces tropicales dont les données sont issues de la littérature (Ruelle, 2006 ; Dlouhá, 2009). La ligne rouge en pointillé marque la moyenne de l'ensemble.

Variation in the MFA of Kevazingo (*G. tessmannii*), Okoumé (*A. klaineana*) and some tropical species for which data are available in the literature (Ruelle, 2006; Dlouhá, 2009). The dashed red line marks the average of the whole.

Variabilité des propriétés du bois

Sources de la variabilité des propriétés du kevazingo

Les résultats du modèle d'analyse de covariance sont présentés dans le tableau III. L'effet des trois facteurs affecte significativement toutes les propriétés. La variance totale partitionnée en pourcentage de variation de chaque facteur (figure 6) révèle qu'excepté pour le PSF, dont les variations sont expliquées principalement par l'effet du rayon (45,9 %), la variabilité de toutes les autres propriétés est attribuée à l'effet de la distance à la moelle. Celle-ci explique en moyenne 50 et 90 % des variations de chacune de ces propriétés.

Source de la variabilité des propriétés chez l'okoumé

Le modèle d'analyse de covariance révèle des effets importants des trois facteurs sur les propriétés du bois de l'okoumé (tableau III). Le partitionnement de la variance totale en pourcentage de variation de chaque facteur (figure 6) montre que l'AMF et le retrait radial sont affectés majoritairement par l'effet arbre. Celui-ci explique respectivement 57,5 % et 46,7 % de la variabilité de ces deux propriétés. Pour le PSF, le retrait longitudinal et le retrait volumique, les variations sont principalement dues à l'effet rayon, 64,2 %, 55,7 % et 39,7 % des variations de ces caractéristiques sont expliquées par ce facteur. Quant à la densité moyenne, l'angle du fil et le retrait tangentiel, la variabilité est attribuée à l'effet distance à la moelle, qui représente 67,9 %, 92,8 % et 51,6 % des variations de ces propriétés.

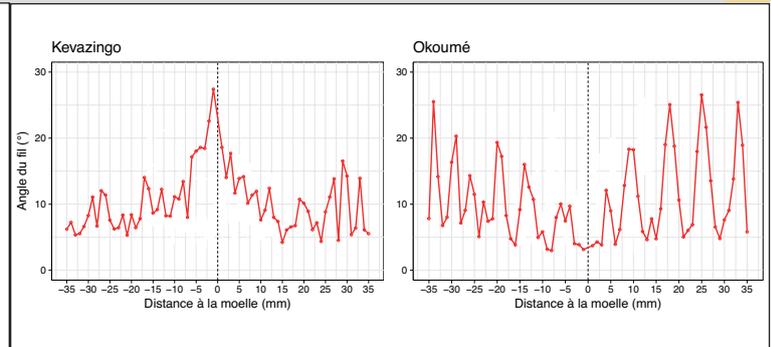


Figure 5.

Profil des variations radiales de l'amplitude de l'angle du fil chez le kevazingo (arbre KV6) et l'okoumé (arbre OK1). La ligne en pointillé représente la moelle.

Profile of radial variations in the amplitude of the wire angle in Kevazingo (tree KV6) and Okoumé (tree OK1). The dotted line represents the medulla.

Discussion

Valeurs moyennes des paramètres structuraux et des propriétés physiques chez le kevazingo et l'okoumé

Les résultats des analyses des propriétés ont des moyennes conformes à celles publiées dans la littérature pour la densité, les retraits et le PSF (Gérard *et al.*, 1998 ; Medzegue, 2007 ; Tropix 7-Cirad, 2012a, 2012b). En ce qui concerne l'AMF et l'angle du fil, il n'y a pas de données dans la littérature. Les variations moyennes d'AMF, comparées à celles d'autres espèces tropicales (Ruelle, 2006 ; Dlouhá, 2009), permettent de distinguer un AMF plutôt élevé chez l'okoumé ($18,1 \pm 3,4^\circ$) tandis que, chez le kevazingo, l'AMF mesuré est de $14 \pm 4,8^\circ$. La figure 4 suggère une possible relation entre l'AMF et le tempérament écologique des espèces. Par ailleurs, chez certaines espèces, ce trait est clairement plus variable que chez d'autres. En ce qui concerne l'angle du fil, c'est surtout sa variation radiale qui est fortement différente entre les deux espèces. Chez le kevazingo, l'angle du fil est fort près de la moelle et s'atténue progressivement à proximité de l'écorce, avec toutefois un léger fil en spirale. Tandis que, chez l'okoumé, le contrefil se développe en s'éloignant de la moelle.

Source de variabilité des paramètres structuraux et des propriétés physiques chez le kevazingo et l'okoumé

Bien que la caractérisation des propriétés moyennes soit une source d'information importante pour la valorisation du bois d'une espèce, la prise en compte de la variabilité de celles-ci est également un aspect non négligeable pour la valorisation optimisée du bois. L'examen des variations des propriétés du bois du kevazingo et de l'okoumé a permis d'analyser l'effet de trois facteurs de variabilité : « l'effet arbre » (variabilité individuelle), « l'effet rayon » (variabilité intra-individuelle entre les deux rayons prélevés

Tableau III.

Analyse de variance, test des effets arbre, rayon des arbres et distance à la moelle sur les propriétés du bois du kevazingo et de l'okoumé.

Analysis of variance, effects test: tree, tree radius and distance to the pith on the wood properties of Kevazingo and Okoumé.

Propriétés	Facteurs	Kevazingo			Okoumé		
		Ddl	Variance	p-value	Ddl	Variance	p-value
DMoy	Arbre	4	114 494	0,0002***	3	24 592	< 0,0002***
	Rayon	4	113 034	0,0002***	4	134 187	< 0,0002***
	Distance moelle	1	5 851 018	0,0002***	1	340 702	< 0,0002***
AMF	Arbre	4	1 137,7	0,0002***	3	1 403,27	< 0,0002***
	Rayon	4	867,7	0,0002***	4	518,28	< 0,0002***
	Distance moelle	1	9 057,3	0,0002***	1	515,29	< 0,0002***
AF	Arbre	4	1 892	0,0002***	3	290,8	< 0,0002***
	Rayon	4	1 671,8	0,0002***	4	397,9	< 0,0002***
	Distance moelle	1	5 340,8	0,0002***	1	9 447,1	< 0,0002***
PSF	Arbre	4	9,22	0,005**	3	84,31	< 0,0002***
	Rayon	4	29,46	0,98	4	245,42	< 0,0002***
	Distance moelle	1	23,81	0,0002***	1	37,94	0,05
Rr	Arbre	4	4,31	0,0002***	3	3,35	< 0,0002***
	Rayon	4	2,5	0,05	4	2,80	< 0,0002***
	Distance moelle	1	50,38	0,0002***	1	0,86	0,05
Rt	Arbre	4	5,93	0,0002***	3	4,20	< 0,0002***
	Rayon	4	2,02	0,0002***	4	9,49	< 0,0002***
	Distance moelle	1	56,73	0,0002***	1	15,09	< 0,0002***
Rl	Arbre	4	0,13	0,0002***	3	0,44	< 0,0002***
	Rayon	4	0,11	0,0001***	4	0,63	< 0,0002***
	Distance moelle	1	1,29	0,0002***	1	0,005	0,05
Rv	Arbre	4	19,45	0,0002***	3	18,93	< 0,0002***
	Rayon	4	6,44	0,0004***	4	28,48	< 0,0002***
	Distance moelle	1	248,63	0,0002***	1	23,79	< 0,0002

DMoy (densité moyenne des cernes) ; AMF (angle des microfibrilles de cellulose) ; PSF (point de saturation des fibres) ; GA (angle du fil) ; Rr (retrait radial) ; Rt (retrait tangentiel) ; Rl (retrait longitudinal) ; Rv (retrait volumique).

*** Ns : non significatif ; * , ** , *** : seuil de significativité. Ddl : degré de liberté.

DMoy (mean ring density); AMF (angle of the cellulose microfibrils); PSF (fibre saturation point); GA (grain angle); Rr (radial shrinkage); Rt (tangential shrinkage); Rl (longitudinal shrinkage); Rv (volume shrinkage).

*Ns: not significant; * , ** , ***: significance threshold. Ddl: degree of freedom.*

au sein du même arbre) et la « distance à la moelle » (variabilité intra-individuelle liée à la position radiale). Ces trois facteurs impactent significativement toutes les propriétés de ces deux espèces (annexes 1-3). L'examen du paramètre de variabilité prépondérant parmi ces trois facteurs nous a permis d'identifier la distance à la moelle comme principale source de variation des propriétés chez le kevazingo. Celle-ci explique en moyenne entre 50 et 90 % des variations de chacune de ces propriétés. Chez l'okoumé, les propriétés sont impactées différemment. Les variations de l'AMF et du retrait radial sont expliquées essentiellement par l'effet arbre. La variabilité du PSF et des retraits longitudinal et volumique est pilotée par l'effet du rayon, tandis que la variabilité de la densité moyenne, de l'angle du fil et du retrait tangentiel est affectée principalement par la distance à la moelle.

La variabilité des propriétés observée avec la distance à la moelle est souvent interprétée comme une adaptation aux besoins fonctionnels (mécanique, hydraulique et protection) qui évoluent avec la taille de l'individu mais aussi en fonction de l'environnement (Lachenbruch *et al.*, 2011). La variation radiale de densité chez les espèces tropicales a fait l'objet d'un grand nombre de publications (Wiemann et Williamson, 1988 ; Chave *et al.*, 2006 ; Plourde *et al.*, 2015 ; Morel *et al.*, 2017, 2018). En général, la tendance est liée à la densité du bois près de la moelle appelée densité initiale. La densité du bois est supposée augmenter pour les bois à densité initiale faible, comme c'est le cas chez l'okoumé, et baisser dans les bois à densité initiale forte, comme c'est le cas chez le kevazingo (Lehnebach, 2015 ; Plourde *et al.*, 2015 ; Lehnebach *et al.*, 2019). On ne dispose que de très peu de données

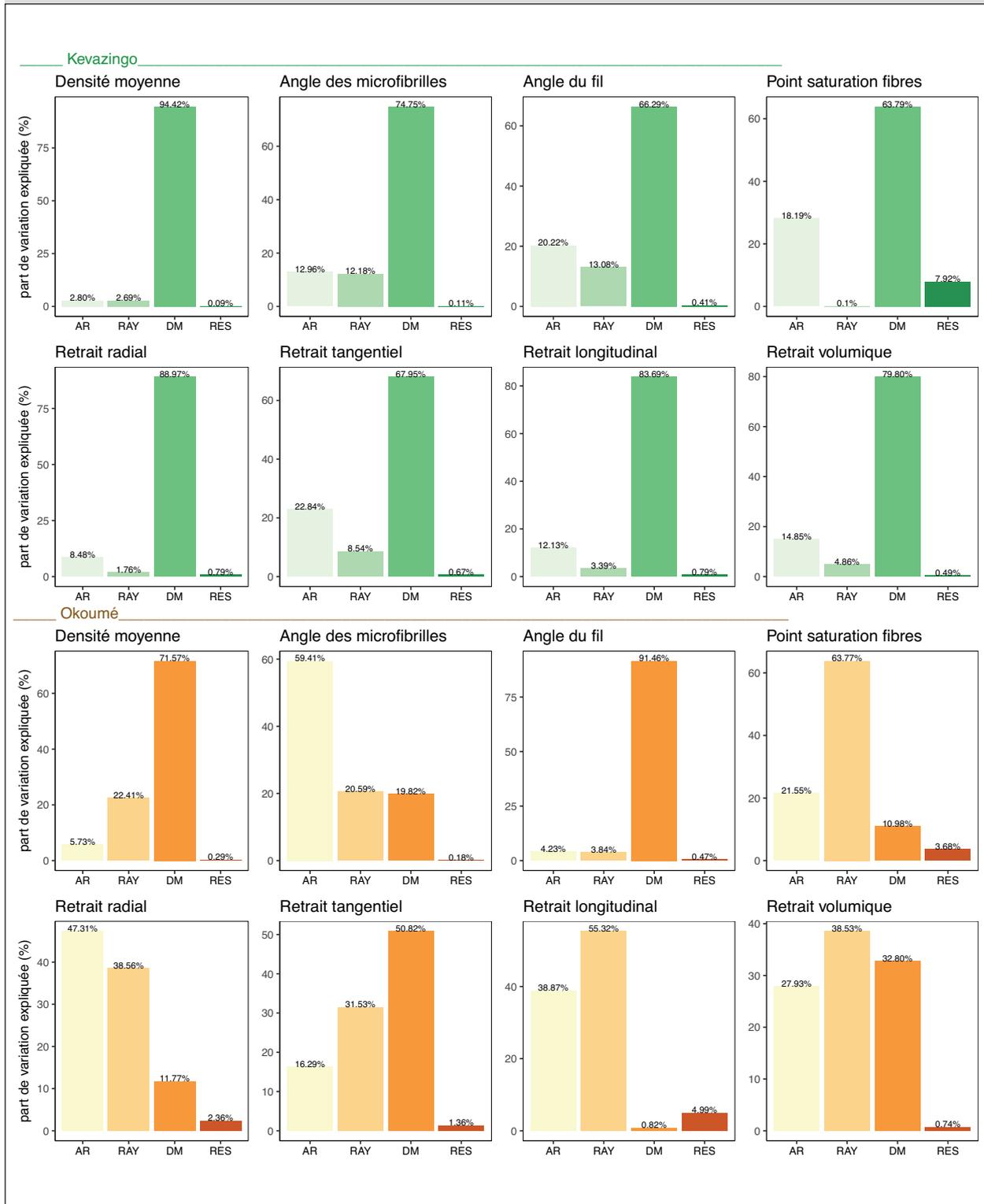


Figure 6.

Partitionnement de la variance de chaque propriété chez le kevazingo et l'okoumé. Les proportions de variance expliquées par chaque facteur sont indiquées sur chaque bande : AR (arbre) ; RAY (rayon des arbres) ; DM (distance à la moelle) ; RES (variance résiduelle).

Partitioning of the variance of each property in Kevazingo and Okoumé. The proportions of variance explained by each factor are indicated on each band: AR (tree); RAY (tree radius); DM (distance to medulla); RES (residual variance).

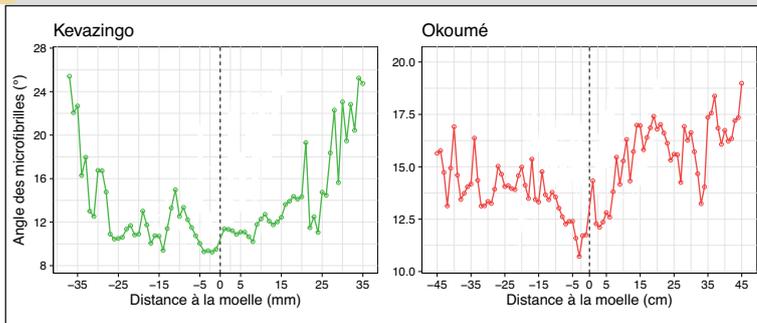


Figure 7.

Profil des variations de l'angle des microfibrilles (AMF) chez le kevazingo (arbre KV6) et l'okoumé (arbre OK1). La ligne en pointillé représente la moelle.

Profile of microfibril angle variations (AMF) in Kevazingo (KV6 tree) and Okoumé (OK1 tree). The dotted line represents the medulla.

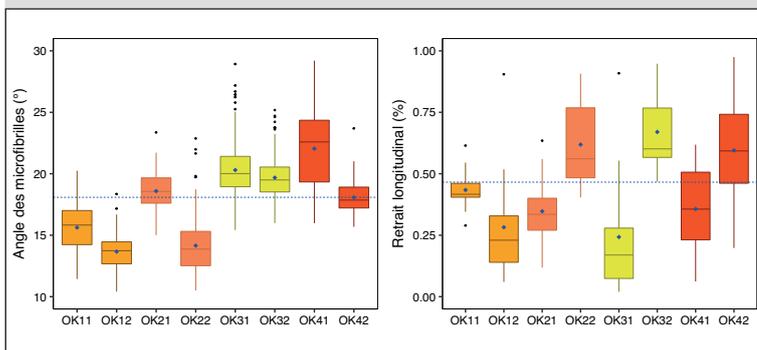


Figure 8.

Variations de l'angle des microfibrilles (AMF) et du retrait longitudinal entre les rayons des arbres chez l'okoumé. La ligne bleue en pointillé représente la valeur moyenne de l'ensemble de la distribution.

Variations in microfibril angle (AMF) and longitudinal shrinkage between tree radiuses in Okoumé. The dotted blue line represents the mean value of the whole distribution.

sur la variation radiale de l'AMF et de l'angle du fil chez les espèces tropicales (Zhang *et al.*, 2011 ; Bossu *et al.*, 2018). Alors que, chez les résineux des climats tempérés, on observe typiquement une baisse d'AMF suivant la distance à la moelle, attribuée en général à un besoin de flexibilité dans le jeune âge qui disparaît une fois que le diamètre de l'arbre est assez important et donc le tronc plus rigide (Burdon et Cown, 2004 ; Clark *et al.*, 2006 ; Moore *et al.*, 2014), chez certaines espèces tropicales, on observe plutôt une augmentation de l'AMF en partant de la moelle vers l'écorce (Zhang *et al.*, 2011). C'est aussi le cas de l'okoumé et du kevazingo (figure 7). Ceci pourrait s'expliquer par des conditions de croissance très différentes dans une forêt tropicale en comparaison d'une forêt tempérée, notamment la densité de la végétation qui fait que, dans le jeune âge, l'arbre est protégé par la canopée. Néanmoins, la tendance radiale de l'angle du fil chez le kevazingo indique que, pour cette espèce héliophile, une flexibilité de la tige dans le jeune stade reste un besoin fonctionnel. Le développement du contrefil observé suivant le rayon chez l'okoumé (espèce héliophile) (Fuhr *et al.*, 2001) peut être lié à l'établissement du houppier et à son exposition progressive au vent (Skatter et Kučera, 1997 ; Bossu *et al.*, 2018). Il est très intéressant de noter que, chez le kevazingo qui pousse dans

le sous-bois, la position radiale apparaît comme source prédominante de la variabilité des propriétés physiques et des paramètres structuraux. Chez l'okoumé, espèce à caractère héliophile, l'importance de la position radiale est effacée par la différence entre les rayons (retrait longitudinal ou volumique) ou par la différence entre les arbres (angle des microfibrilles ou retrait radial). L'importance de l'effet rayon et de l'effet arbre, notamment pour l'angle des microfibrilles et le retrait longitudinal, peut être liée à une possible présence de bois de tension (figure 8), assez typique des héliophiles qui ont un besoin important de modifier l'orientation de leur tige (Medzegue, 2007). On peut imaginer que chez cette espèce pionnière, à croissance rapide, qui colonise souvent les trouées forestières et les interfaces forêt-savane (Meunier *et al.*, 2015), les contraintes extérieures seraient beaucoup plus présentes, conduisant ainsi l'arbre à exprimer davantage sa plasticité phénotypique. Un approfondissement de la relation entre les différents paramètres mesurés fera l'objet d'une prochaine étude.

Conclusion

Les paramètres structuraux et les propriétés physiques du bois ont été analysés chez le kevazingo, *Guibourtia tessmannii*, et l'okoumé, *Aucoumea klaineana*. L'approche avait pour objectif d'acquérir les principales caractéristiques structurales et physiques qui ont un impact sur l'utilisation potentielle du matériau. Les résultats obtenus dans ce travail permettent d'acquérir de nouvelles connaissances sur la variabilité des propriétés de ces espèces pouvant ainsi permettre d'optimiser leur potentiel de valorisation. Chez les deux espèces, les propriétés examinées correspondent aux valeurs moyennes de la littérature, notamment pour la densité moyenne, les retraits et le PSF. L'angle des microfibrilles de cellulose (AMF) et l'angle du fil ont également fait l'objet d'une première caractérisation. Tandis que le kevazingo montre un léger fil en spirale, l'okoumé développe un contrefil important. L'étude des sources de variabilité a permis de mettre en évidence un fort contrôle ontogénétique de toutes les propriétés mesurées chez le kevazingo tandis que ce contrôle était moins fort chez l'okoumé. En particulier, l'angle des microfibrilles paraît ne pas être lié seulement au gradient radial mais surtout à une différence entre les individus. Un lien entre la stratégie écologique de l'espèce et l'expression de sa plasticité a été suggéré pour expliquer cette différence.

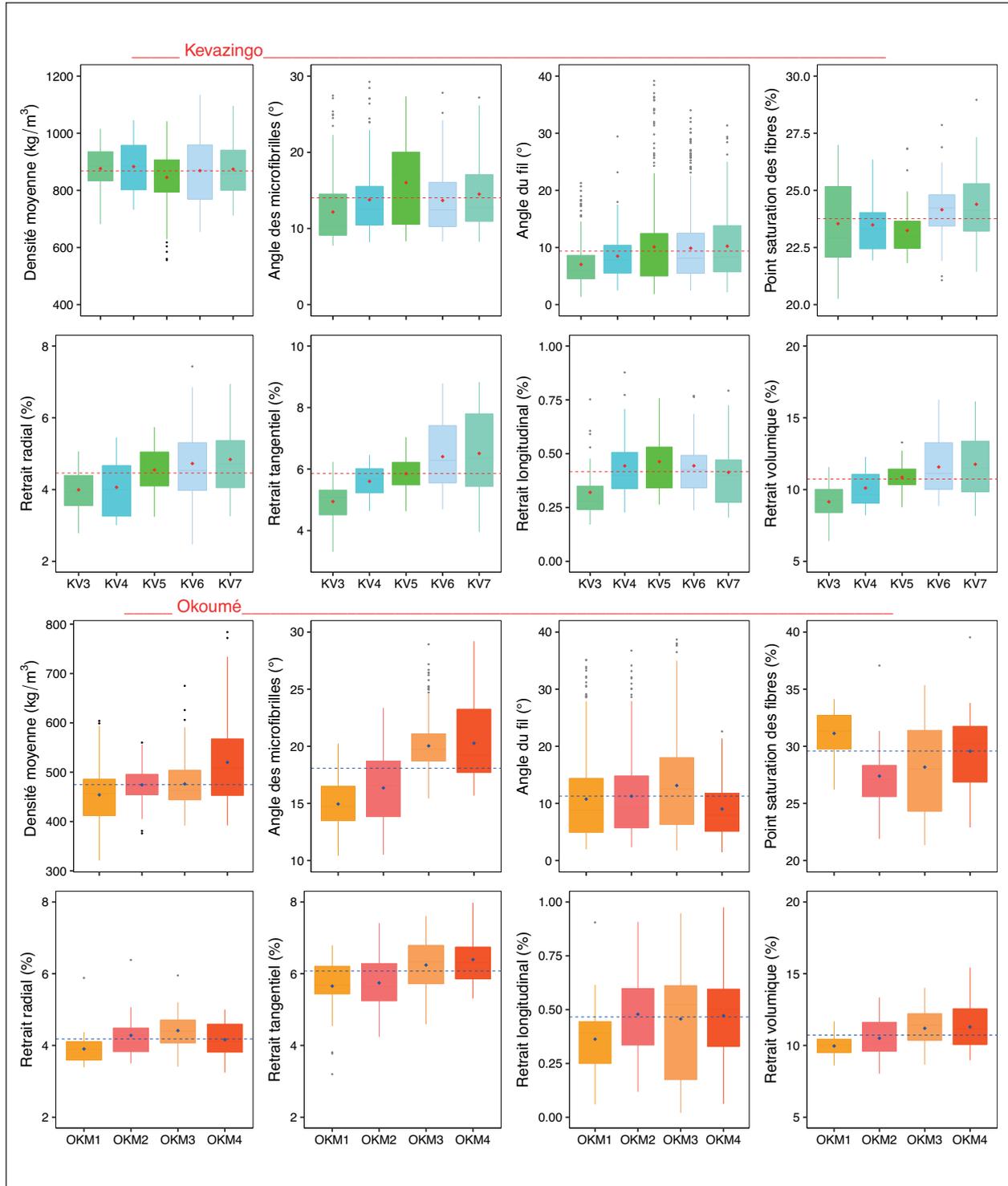
Remerciements

Ce travail a bénéficié de l'appui technique et pédagogique de l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE, France). Les auteurs remercient SILVATECH pour sa participation aux différentes analyses (microdensitométrie, AMF). SILVATECH bénéficie du soutien du laboratoire ARBRE (ANR-11-LABX-0002-01). Nous tenons également à remercier l'École nationale des eaux et forêts du Gabon (ENEF), qui a permis la réalisation de cette étude.

Annexe 1.

Variations des propriétés entre arbres chez le kevazingo et l'okoumé. Les lignes rouges et bleues en pointillé représentent les valeurs moyennes de l'ensemble des arbres. Les points rouges et bleus de chaque boîte à moustaches représentent la valeur moyenne de chaque arbre.

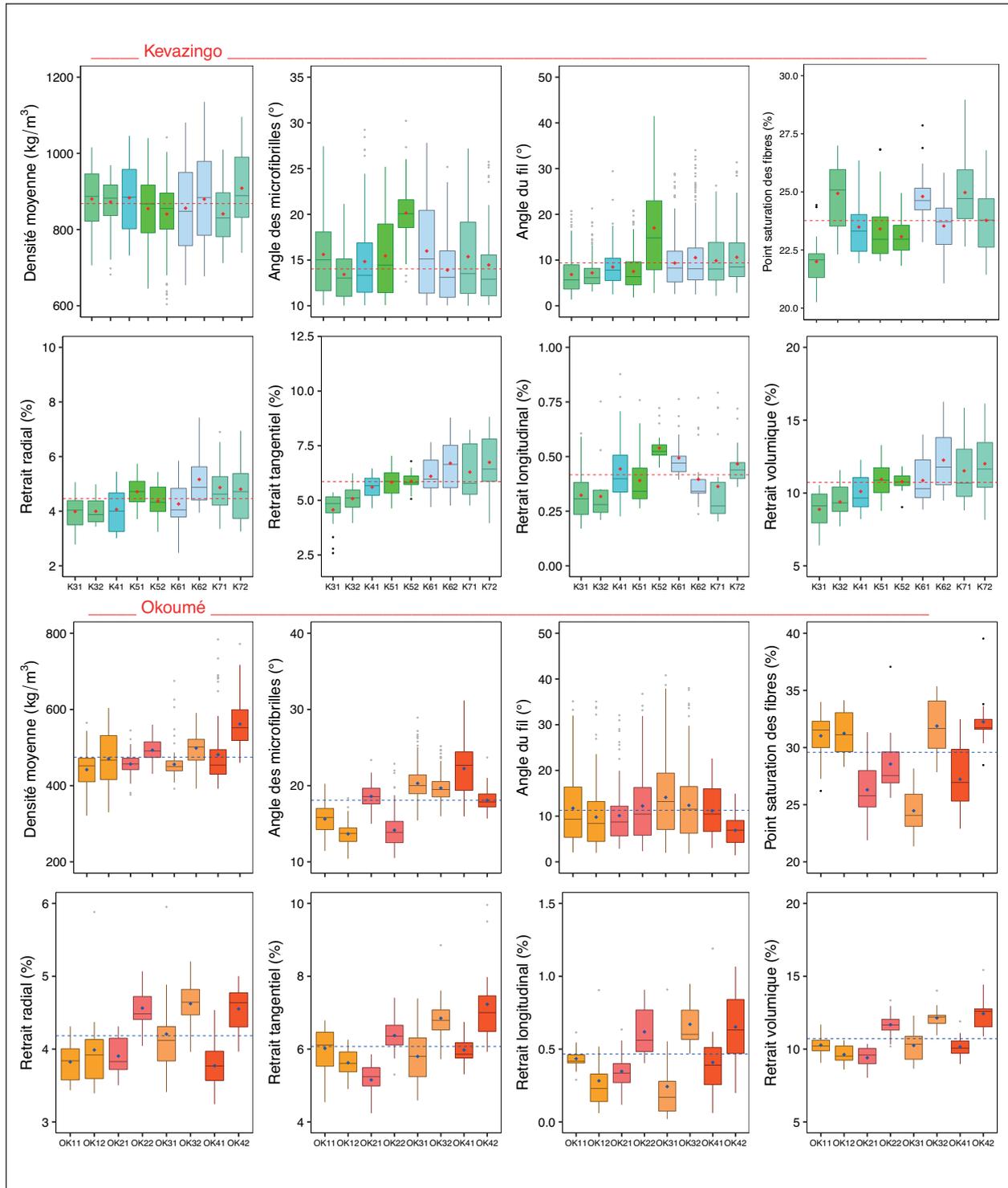
Variations in properties between trees in Kevazingo and Okoumé. The red and blue dotted lines represent the average values for all trees. The red and blue dots on each boxplot represent the average value for each tree.



Annexe 2.

Variations des propriétés entre les rayons chez le kevazingo et l'okoumé. Chaque boîte à moustaches représente un rayon. Les lignes rouges et bleues en pointillé représentent les valeurs moyennes de l'ensemble des arbres. Les points rouges et verts de chaque boîte à moustaches représentent la valeur moyenne de chaque arbre.

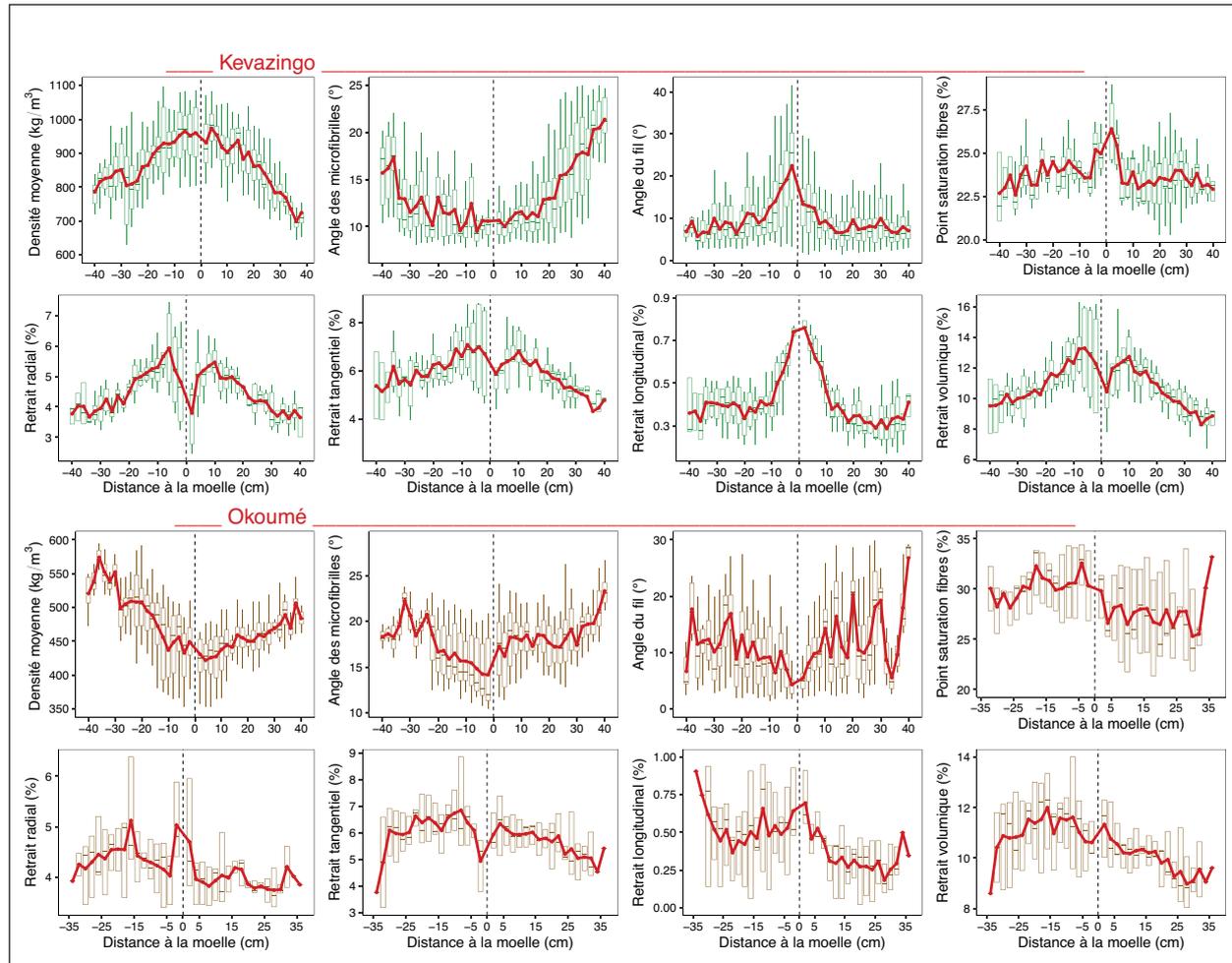
Variations in properties between the radiuses in Kevazingo and Okoumé. Each boxplot represents a radius. The dotted red and blue lines represent the average values of all the trees. The red and blue dots of each boxplot represent the average value of each tree.



Annexe 3.

Variations des propriétés du bois avec la distance à la moelle chez le kevazingo et l'okoumé. Chaque boîte représente la distribution des éprouvettes de l'ensemble des arbres pour une même position radiale. Les profils en rouge représentent les variations moyennes de la distribution le long de chaque rayon. La ligne en pointillé représente la moelle.

Variations in wood properties with distance to the pith in Kevazingo and Okoumé. Each boxplot represents the distribution of specimens from all the trees for the same radial position. The profiles in red represent the average variations of the distribution along each radius. The dotted line represents the medulla.



Références

Bédoungindzi W. F., 2020. Caractérisation chimique et application à la préservation du bois des oléorésines d'*Aucoumea klaineana* (Okoumé), *Canarium schweinfurthii* (Aiélé), *Dacryodes buettneri* (Ozigo) et *Dacryodes edulis* (Safoutier) du Gabon. Thèse, Université de Lorraine, France, 240 p. https://docnum.univ-lorraine.fr/ulprive/DDOC_T_2020_0070_BEDOUNGUINDZI.pdf

Bossu J., Lehnebach R., Corn S., Regazzi A., Beauchêne J., Clair B., 2018. Interlocked grain and density patterns in *Bagassa guianensis*: changes with ontogeny and mechanical consequences for trees. *Trees*, 32 (6): 1643-1655. <https://doi.org/10.1007/s00468-018-1740-x>

Burdon R. D., Cown D. J., 2004. Juvenile versus mature wood: A new concept, orthogonal to corewood versus outerwood, with special reference to *Pinus radiata* and *P. taeda*. *Forest Science*, 50 (4): 399-415. <https://academic.oup.com/forestscience/article-abstract/50/4/399/4617541>

Cabrolier P., Beauchêne J., Thibaut B., 2009. Is interlocked grain an adaptive trait for tropical tree species in rainforest? In: Thibaut B. (ed.). Sixth Plant Biomechanics Conference, November 16th-21st 2009, Cayenne, French Guyana. CNRS, Cirad, INRA, 279-284. http://www.iap.tuwien.ac.at/~gebeshuber/Proceedings_PBM_2009.pdf

Cabrolier P., 2012. Caractérisation des propriétés structurales et mécaniques des composantes pariétales du bois à l'échelle du tissu. Thèse de doctorat, AgroParisTech, France, 254 p. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-02998851/document>

- Cave I. D., 1966. Theory of X-ray measurement of microfibril angle in wood. Part 1. The condition for reflection X-ray diffraction by materials with fibre type symmetry. *Wood Science and Technology*, 31 (3): 143-152. <https://doi.org/10.1007/BF00705881>
- Chave J., Muller-Landau H. C., Baker T. R., Easdale T. A., Hans Steege T. E. R., Webb C. O., 2006. Regional and phylogenetic variation of wood density across 2456 neotropical tree species. *Ecological Applications*, 16 (6): 2356-2367. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2006\)016\[2356:RAPVOW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2006)016[2356:RAPVOW]2.0.CO;2)
- CITES, 2016. Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction. CITES, CoP17 Prop.56, 39 p. <https://www.atibt.org/wp-content/uploads/2016/12/Examen-des-propositions-damendement-des-annexes-I-et-II.pdf>
- Clark A., Richard F. D., Lewis J., 2006. Juvenile/mature wood transition in loblolly pine as defined by annual ring specific gravity, proportion of latewood, and microfibril angle. *Wood and Fiber Science*, 38 (2): 292-299. <http://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/495>
- Dlouhá J., 2009. Comportement viscoélastique du bois vert : diversité et prédiction à long terme. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, France, 164 p. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00567065/document>
- Engozogho A. S. P., Bikoro Bi Athomo A., Safou Tchiana R., Santiago-Medina F. J., Cabaret T., Pizzi A., et al., 2020. The condensed tannins of Okoume (*Aucoumea klaineana* Pierre): A molecular structure and thermal stability study. *Scientific Reports*, 10 (1): 1773. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58431-7>
- Fuhr M., Nasi R., Delegue M.-A., 2001. Vegetation structure, floristic composition and growth characteristics of *Aucoumea klaineana* Pierre stands as influenced by stand age and thinning. *Forest Ecology and Management*, 140 (2-3): 117-132. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00320-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00320-0)
- Gérard J., Guibal D., Paradis S., Cerre J.-C., 2017. Tropical Timber Atlas. Versailles, France, Édirions Quæ, 1 002 p. https://www.itto.int/files/itto_project_db_input/3028/Technical/E-TMT-SDP-010-12-R1-M-Tropical%20Timber%20Atlas.pdf
- Gérard J., Kouassi A. E., 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/515643/>
- Guilley E., Loubère M., Nepveu G., 1999. Identification en forêt de chênes sessiles (*Quercus petraea*) présentant un angle du fil du bois intrinsèquement faible. *Canadian Journal of Forest Research*, 29 (12) : 1958-1965. <https://doi.org/10.1139/x99-141>
- Koubaa A., Isabel N., Zhang S. Y., Beaulieu J., Bousquet J., 2005. Transition from juvenile to mature wood in black spruce. *Wood and Fiber Science*, 37 (3): 445-455. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/367>
- Lehnebach R., 2015. Étude de la variabilité ontogénique du profil ligneux chez quelques espèces forestières tropicales de Guyane française. Thèse de doctorat, Université de Montpellier, France, 268 p. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01306246/document>
- Lehnebach R., Bossu J., Amusan N., 2019. Wood Density Variations of Legume Trees in French Guiana along the Shade Tolerance Continuum: Heartwood Effects on Radial Patterns and Gradients. *Forests*, 10 (2): 1-22. <https://doi.org/10.3390/f10020080>
- Lachenbruch B., Moore J. R., Evans R., 2011. Radial Variation in Wood Structure and Function in Woody Plants, and Hypotheses for Its Occurrence. In: Size- and age-related changes in tree structure and function. Meinzer F. C., Lachenbruch B., Dawson T. E. (eds). Springer, 4 : 121-164. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-1242-3>
- Mapaga D., Ingeza D., Louppe D., Koumba Zaou P., 2002. Okoumé. Fiches des caractéristiques botaniques, écologiques et des usages du bois des arbres de la forêt équatoriale. Cirad, 6 p. <https://www.atibt.org/wp-content/uploads/2017/06/Okoume.pdf>
- Medzegue M. J., 2007. Étude comparative des bois d'Okoumé (*Aucoumea Klaineana* P.) issus des plantations et de la forêt naturelle : anatomie, durabilité naturelle. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, France, 201 p. <http://www.theses.fr/2007BOR13393>
- Meunier Q., Moumbogou C., Doucet J.-L., 2015. Les arbres utiles du Gabon. Gembloux, Belgique, Presses Agronomiques de Gembloux, 340 p. <https://www.gembloux.ulg.ac.be/gestion-des-ressources-forestieres/2016/12/29/les-arbres-utiles-du-gabon/>
- Moore J. R., Cown D. J., McKinley R. B., 2014. Modelling microfibril angle variation in New Zealand-grown radiata pine. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 44 (25): 1-11. <https://doi.org/10.1186/s40490-014-0025-4>
- Morel H., Lehnebach R., Cigna J., Ruelle J., Nicolini E.-A., Beauchêne J., 2018. Basic wood density variations of *Parkia velutina* Benoist, a long-lived heliophilic Neotropical rainforest tree. *Bois et Forêts des Tropiques*, 335 (1) : 59-69. <https://doi.org/10.19182/bft2018.335.a31518>
- 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>
- Mothe F., Duchanois G., Zannier B., Leban J.-M., 1998. Analyse microdensitométrique appliquée au bois : méthode de traitement des données utilisée à l'Inra-ERQB (programme Cerd). *Annales des Sciences Forestières*, 55 (3): 301-313. <https://doi.org/10.1051/forest:19980303>
- Ngwa Obame S., Ziegler-Devin I., Safou-Tchima R., Brosse N., 2019. Homolytic and Heterolytic Cleavage of β -Ether Linkages in Hardwood Lignin by Steam Explosion. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67 (21): 5989-5996. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b01744>

Pambou Nziengui C. F., Ikogou S., Moutou Pitti R., 2018. Impact of cyclic compressive loading and moisture content on the mechanical behavior of *Aucoumea Klaineana* Pierre. *Wood Material Science and Engineering*, 13 (4): 190-196. <https://doi.org/10.1080/17480272.2017.1307281>

Plourde B. T., Boukili V. K., Chazdon R. L., 2015. Radial changes in wood specific gravity of tropical trees: Inter- and intraspecific variation during secondary succession. *Functional Ecology*, 29 (1): 111-120. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12305>

Polge H., 1966. Établissement des courbes de variation de la densité du bois par exploration densitométrique de radiographies d'échantillons prélevés à la tarière sur des arbres vivants : applications dans les domaines Technologique et Physiologique. *Annales des Sciences Forestières*, 23 (1): 1-206. <https://doi.org/10.1051/forest/19660101>

R Core Team, 2018. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria, R Foundation for Statistical Computing. <https://www.gbif.org/fr/tool/81287/r-a-language-and-environment-for-statistical-computing>

Ruelle J., 2006. Analyse de la diversité du bois de tension de 3 espèces d'angiospermes de forêt tropicale humide de Guyane Française. Thèse de doctorat, Université Antilles-Guyane, France, 376 p.

Senft J. F., Bendtsen B. A., 1985. Measuring microfibrillar angles using light microscopy. *Wood and Fiber Science*, 17 (4): 564-567. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/289>

Skatter S., Kučera B., 1997. Spiral grain – An adaptation of trees to withstand stem breakage caused by wind-induced torsion. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 55: 207-213. <https://doi.org/10.1007/BF02990549>

Tosso F., Kasso D., Olivier J. H., Sinsin B., Doucet J.-L., 2015. Le genre *Guibourtia* Benn., un taxon à haute valeur commerciale et sociétale (synthèse bibliographique). *Bio-technologie, Agronomie, Société et Environnement* 19 (1) : 71-88. <https://www.gembloux.ulg.ac.be/gestion-des-ressources-forestieres/2015/12/01/le-genre-guibourtia-benn-un-taxon-a-haute-valeur-commerciale-et-societale-synthese-bibliographique/>

Tropix 7-Cirad, 2012a. Les principales caractéristiques technologiques de 245 essences forestières tropicales : fiche BUBINGA. Cirad, UR BioWooEB. <https://doi.org/10.18167/74726F706978>

Tropix 7-Cirad, 2012b. Les principales caractéristiques technologiques de 245 essences forestières tropicales : fiche OKOUMÉ. Cirad, UR BioWooEB. <https://doi.org/10.18167/74726F706978>

Waring E., Quinn M., McNamara A., De La Rubia E. A., Zhu H., Shannon E., 2020. skimr: Compact and flexible summaries of data. R package version 2.1.1. <https://github.com/ropensci/skimr>

Wheeler B., Torchio M., 2016. lmPerm: Permutation tests for linear models. R package version 1.1-2. <https://github.com/mtorchio/lmPerm>

Wiernann M. C., Williamson G. B., 1988. Extreme radial changes in wood specific gravity in some tropical pioneers. *Wood and Fiber Science*, 20 (3): 344-349. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1938>

Zhang T., Bai S. L., Bardet S., Alméras T., Thibaut B., Beauchêne J., 2011. Radial variations of vibrational properties of three tropical woods. *Journal of Wood Science*, 57 (5): 377-386. <https://doi.org/10.1007/s10086-011-1189-7>

Zobel B. J., Sprague J. R., 1998a. Characteristics of Juvenile Wood. In: *Juvenile Wood in Forest Trees*. Berlin, Heidelberg, Germany, Springer, Series in Wood Science, 21-55. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-72126-7_2

Zobel B. J., Sprague J. R., 1998b. The Importance of Juvenile Wood. In: *Juvenile Wood in Forest Trees*. Berlin, Heidelberg, Germany, Springer, Series in Wood Science, 188-215. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-72126-7_7

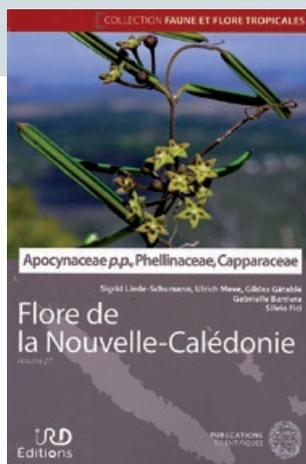
Zue Ondo *et al.* – Contribution des auteurs

Rôle du contributeur	Noms des auteurs
Conceptualisation	M. Fournier, J. Dlouhá, J. Ruelle
Gestion des données	J.-L. Zue Ondo, J. Ruelle, J. Dlouhá
Analyse formelle	J.-L. Zue Ondo
Acquisition du financement	J. Ruelle
Enquête et investigation	J.-L. Zue Ondo, J. Ruelle
Méthodologie	J. Ruelle, J. Dlouhá
Gestion de projet	M. Fournier, J. Ruelle
Ressources	J. Ruelle
Logiciels	J.-L. Zue Ondo, J. Ruelle
Supervision	M. Fournier, J. Dlouhá, J. Ruelle
Validation	J. Dlouhá, J. Ruelle, M. Fournier
Visualisation	J.-L. Zue Ondo, J. Dlouhá
Écriture – Préparation de l'ébauche originale	J.-L. Zue Ondo, J. Ruelle
Écriture – Révision et édition	J. Dlouhá, J. Ruelle

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

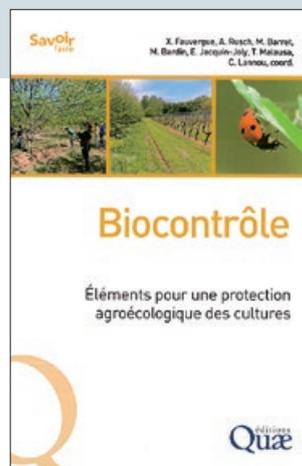


LIEDE-SCHUMANN S., MEVE U., GATEBLÉ G., BARRIERA G., FICI S., 2020. **APOCYNACEAE P.P., PHELLINACEAE, CAPPARACEAE : FLORE DE LA NOUVELLE-CALÉDONIE**. FRANCE, IRD ÉDITIONS, MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE, 336 P.

L'exceptionnelle richesse floristique de la Nouvelle-Calédonie est mondialement connue. Plus de 3 400 espèces de plantes vasculaires indigènes y sont répertoriées, dont les trois quarts sont endémiques de l'archipel. L'endémisme ne concerne pas seulement les espèces, mais aussi les genres (près d'une centaine) et même trois familles. La diversité se décline aussi sur le plan écologique, en lien avec l'histoire géologique originale de la Nouvelle-Calédonie, qui a favorisé le micro-endémisme et les espèces inféodées aux substrats ultramafiques. De nouvelles espèces continuent à être découvertes, aussi reste-t-il nécessaire de poursuivre prospections et recherches botaniques, afin de mieux comprendre l'origine et l'évolution de cette flore, et contribuer à sa préservation. Le présent volume regroupe trois familles d'Angiospermes. Celle des Apocynaceae dont la classification a été profondément remaniée depuis la publication en 1981 du fascicule « Apocynaceae », volume 10 de la *Flore de la Nouvelle-Calédonie et dépendances* : les trois sous-familles traitées ici (Periplocoideae, Secamonoideae et Asclepiadoideae) formaient auparavant la famille des Asclepiadaceae. Les Phellinaceae qui, avec 10 espèces ligneuses, constituent l'une des trois familles endémiques du territoire. Enfin, la Nouvelle-Calédonie héberge quelques espèces de la famille cosmopolite des Capparaceae, toutes appartenant au genre du câprier (*Capparis*). Conformément à la ligne éditoriale de la collection, cet ouvrage comporte, pour chaque famille traitée indépendamment : une présentation générale suivie de descriptions détaillées des genres et des espèces ; des clés d'identification, en français et en anglais ; une illustration variée comprenant des dessins au trait et des photographies des plantes vivantes ; des cartes de répartition et une évaluation des besoins de conservation selon les critères de l'UICN.

Adapté du résumé de l'éditeur.

IRD Éditions, 911 avenue Agropolis, BP 65501,
34394 Montpellier cedex 5, France.
www.editions.ird.fr



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.

Adapté du résumé de l'éditeur.

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

Potentialité des données satellitaires Sentinel-2 pour la cartographie de l'impact des feux de végétation en Afrique tropicale : application au Togo



Photo 1.
Feux de végétation en zone savanicole dans la région de la Kara, au Togo.
Vegetation fires in the savannah zone in the Kara Region, Togo.
Photo Y. Konko.

Yawo KONKO^{1,2}
Bareremna AFELU³
Kouami KOKOU⁴

¹ Observatoire national de l'environnement
Agence nationale de gestion
de l'environnement (ANGE)
Lomé
Togo

² West African Science Service Centre
on Climate Change
and Adapted Land Use (WASCAL)
Federal University of Technology
Minna
Nigeria

³ Ministère de l'Environnement,
du Développement durable
et de la Protection de la Nature (MEDDPN)
Lomé
Togo

⁴ Université de Lomé
Faculté des sciences
Laboratoire de recherche forestière
Lomé
Togo

Auteur correspondant / Corresponding author:
Yawo KONKO – konkoyawo2@gmail.com

Doi : 10.19182/bft2021.347.a36349 – Droit d'auteur © 2021, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 16 juin 2020 ;
date d'acceptation : 16 décembre 2020 ; date de publication : 25 février 2021.



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

Citer l'article / To cite the article

Konko Y., Afelu B., Kokou K., 2021. Potentialité des données satellitaires Sentinel-2 pour la cartographie de l'impact des feux de végétation en Afrique tropicale : application au Togo. Bois et Forêts des Tropiques, 347: 59-75. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2021.347.a36349>

RÉSUMÉ

Potentialité des données satellitaires Sentinel-2 pour la cartographie de l'impact des feux de végétation en Afrique tropicale : application au Togo

Le réchauffement climatique est un phénomène d'envergure mondiale qui se répercute sur le système climatique. Une des conséquences du réchauffement climatique est l'extension de la période de sécheresse, favorisant ainsi l'augmentation des fréquences du phénomène des feux de végétation. Les feux incontrôlés perturbent l'écologie et la fonctionnalité des écosystèmes, entraînant parfois leur érosion. La présente étude est une contribution pour la gestion des feux de végétation au Togo et porte sur le suivi spatial pour la saison des feux 2018-2019. Elle explore la potentialité des nouvelles données satellitaires Sentinel-2 (S-2) en accès libre dans la gamme de la télédétection optique pour la détection des surfaces brûlées, la cartographie des feux utilitaires et des feux incontrôlés. Elle teste également la performance de la méthode de cartographie des feux de végétation à partir de l'indice NBR (*Normalized Burn Ratio*) initialement conçue pour les images Landsat et évalue la biomasse végétale brûlée. Les résultats révèlent que les images S-2 présentent du potentiel dans la restitution des surfaces brûlées. La performance de la méthode de l'indice NBR sur les images S-2 est satisfaisante. La cartographie des feux de végétation montre que les feux utilitaires représentent 21,75 % contre 78,25 % pour les feux incontrôlés. L'ensemble des feux de végétation enregistrés a occasionné l'incendie de 5 878 km² du couvert végétal, soit 10,39 % du territoire national. Le couvert végétal brûlé est composé majoritairement de savanes (33,12 %), de cultures et jachères (24,48 %), de plantations (14,59 %), de forêts claires (14,43 %) et de forêts riveraines (13,02 %). Les résultats obtenus constituent des éléments tangibles pour le suivi, la sensibilisation, l'élaboration des plans d'aménagement, de prévention et de gestion des feux.

Mots-clés : feux de végétation, feux utilitaires, feux incontrôlés, indice NBR, image Sentinel-2, occupation du sol, télédétection, Togo.

ABSTRACT

Potential of Sentinel-2 satellite data to map the impacts of bush fires in tropical Africa: application in Togo

Climate warming is a global phenomenon which is affecting the whole climate system. One of its consequences is the longer duration of drought periods, which is increasing the frequency of bush fires. Uncontrolled wildfires disrupt the ecology and functions of ecosystems, sometimes eroding them. This study, focusing on satellite monitoring during the bush fire season in 2018-2019, offers a contribution to support bush fire management in Togo. We explore the potential of new satellite data from Sentinel-2 (S-2), available as open-access remote sensing data for optical detection of burned areas and mapping of both utilitarian and uncontrolled fires. The data can also be used to test the performance of bush fire mapping methods by means of the NBR index (Normalized Burn Ratio), initially designed for Landsat images to assess burned plant biomass. The results show the potential usefulness of S-2 images in mapping burned areas and a satisfactory performance of the NBR method with S-2 images. Mapping of bushfires shows that utilitarian fires account for 21.75% of all fires as opposed to 78.25% for uncontrolled fires. Together, the bush fires recorded destroyed plant cover over 5,878 km², or 10.39% of Togo's surface area. The plant cover burned mainly comprises savannah land (33.12%), crops and fallows (24.48%), plantations (14.59%), open woodland (14.43%) and riparian forest (13.02%). The results obtained provide tangible evidence to support monitoring, awareness-raising, planning and development of bush fire prevention and management plans.

Keywords: bush fires, utilitarian fires, uncontrolled fires, NBR index, Sentinel-2 image, land use, remote sensing, Togo.

RESUMEN

Potencial de los datos del satélite Sentinel-2 para cartografiar el impacto de los fuegos de vegetación en el África tropical: aplicación en Togo

El calentamiento global es un fenómeno mundial que afecta al sistema climático. Una de las consecuencias del calentamiento global es la extensión del periodo de sequía, lo que aumenta la frecuencia de los fuegos de vegetación. Los incendios no controlados causan perturbaciones en la ecología y en las funciones de los ecosistemas, en ocasiones erosionándolos. El presente estudio es una contribución a la gestión de los fuegos de vegetación en Togo y se centra en el seguimiento espacial de la temporada de incendios 2018-2019. Explora el potencial de los nuevos datos del satélite Sentinel-2 (S-2), de acceso libre en el ámbito de la teledetección óptica, para localizar superficies quemadas y cartografiar los fuegos útiles y los incendios no controlados. También comprueba el rendimiento del método de cartografía de fuegos de vegetación mediante el índice NBR (*Normalized Burn Ratio*, índice de quema normalizado) desarrollado originariamente para las imágenes Landsat, y evalúa la biomasa vegetal quemada. Los resultados revelan que las imágenes del S-2 pueden ser útiles para restaurar las superficies quemadas. El rendimiento del método del índice NBR en las imágenes del S-2 es satisfactorio. La cartografía de los fuegos de vegetación muestra que los fuegos útiles representan el 21,75 %, frente al 78,25 % para los incendios no controlados. El conjunto de los fuegos de vegetación registrados quemó 5 878 km² de cubierta vegetal, es decir, el 10,39 % del territorio nacional. La cubierta vegetal quemada era principalmente sabana (33,12 %), cultivos y barbechos (24,48 %), plantaciones (14,59 %), bosques abiertos (14,43 %) y bosques de ribera (13,02 %). Los resultados obtenidos constituyen elementos tangibles para el seguimiento, la sensibilización y la elaboración de planes de ordenación, prevención y gestión de incendios.

Palabras clave: fuegos de vegetación, fuegos útiles, incendios no controlados, índice NBR, imagen del Sentinel-2, uso del suelo, teledetección, Togo.

Introduction

Le changement climatique est un phénomène d'envergure mondiale qui affecte de nombreux écosystèmes naturels (IPCC, 2018). Le réchauffement climatique issu des émissions de gaz à effet de serre (GES) augmente sans cesse le nombre d'événements météorologiques extrêmes tels que les pluies diluviennes et la sécheresse. Cette dernière est un contributeur clé aux phénomènes des feux de végétation qui engendrent des impacts coûteux sur l'agriculture, les moyens de subsistance et la santé humaine.

À l'échelle globale, l'évaluation récente basée sur les satellites d'observation de la Terre estime qu'environ 4 millions de km² sont brûlés dans le monde chaque année (Chuvieco *et al.*, 2018). Les feux de végétation sont ainsi considérés comme l'un des facteurs affectant la chimie atmosphérique à travers les émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols (Knorr *et al.*, 2016). Au niveau des écosystèmes forestiers, les feux affectent le bilan carbone (Yue *et al.*, 2015), les structures horizontales et verticales des peuplements (Bowman *et al.*, 2009) et demeurent un moteur important de transformation spatiale (Lewis *et al.*, 2015). Dans les zones densément peuplées, les feux de végétation ont des impacts négatifs sur la qualité de l'air avec des effets connexes sur la santé des enfants et des personnes ayant des maladies cardiaques et des problèmes respiratoires (Reid *et al.*, 2016). Au-delà de la végétation, ces feux génèrent des victimes humaines et animales lors de la propagation des incendies (Doerr *et al.*, 2006 ; Chuvieco *et al.*, 2010).

Le continent africain n'est pas épargné par le phénomène des feux de végétation. En Afrique tropicale, bien que les feux de végétation soient une pratique ancestrale dans l'agriculture et la gestion des terres (Sow *et al.*, 2013 ; Kamau et Medley, 2014), le réchauffement climatique a grandement contribué à l'augmentation de ce phénomène à travers l'extension de la période de sécheresse et de celle de canicule.

Dans de nombreux pays d'Afrique de l'Ouest comme le Togo, il existe deux types de feux de végétation : les feux utilitaires et les feux incontrôlés. Selon la loi togolaise n° 2008-09 du code forestier, les feux utilitaires désignent les surfaces brûlées inférieures à 0,5 ha alors que les feux incontrôlés représentent les surfaces brûlées supérieures ou égales à 0,5 ha. Au Togo, les feux de végétation sont très courants. Mais, au-delà de certaines normes, les feux utilitaires pour l'agriculture, le pastoralisme, le renouvellement de la paille et le nettoyage des champs échappent au contrôle humain et deviennent des feux incontrôlés qui ont des impacts nocifs pour les écosystèmes forestiers, l'environnement et les populations. Selon certains auteurs, les feux incontrôlés dégradent les écosystèmes, modifient le paysage et perturbent la tranquillité de la biocénose avec des conséquences importantes pour la survie et l'écologie des habitats (Konko, 2016 ; Chuvieco *et al.*, 2019). Pour documenter ces phénomènes, les systèmes de contrôle et de suivi des feux de végétation constituent des moyens idéaux pour une meilleure gestion de l'environnement. Selon plusieurs auteurs, la télédétection est un outil opérationnel pour le suivi des feux de végétation (Afelu, 2016 ; Mpakairi *et al.*, 2020).

La télédétection se présente comme un des meilleurs outils pour la surveillance terrestre (Konko *et al.*, 2020). En effet, elle a la capacité d'observer une même unité spatiale sur plusieurs intervalles de temps et fournit des informations spatio-temporelles relatives (González *et al.*, 2013). La télédétection offre ainsi un potentiel considérable pour surveiller les feux de végétation. Au cours des dernières décennies, la télédétection a été largement utilisée pour surveiller les zones brûlées à l'échelle mondiale. Plusieurs capteurs embarqués sur des satellites enregistrent les émissions thermiques et la réflectance spatiale afin de produire des données pour le suivi des feux. Parmi les capteurs les plus utilisés pour la cartographie des feux, on peut citer les capteurs *Thematic Mapper* (TM ; Veraverbeke *et al.*, 2010b ; Bastarrika *et al.*, 2011), *Enhanced Thematic Mapper plus* (ETM+ ; Smith *et al.*, 2007 ; Bastarrika *et al.*, 2011), *Operational Land Imager* (OLI ; Schroeder *et al.*, 2016), *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER ; Stroppiana *et al.*, 2009 ; Boschetti *et al.*, 2010), *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS ; Smith *et al.*, 2007), *VEGETATION* (VGT ; Lasaponara, 2006 ; Bartalev *et al.*, 2007), *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR ; Chuvieco *et al.*, 2008), *MultiSpectral Instrument* (MSI ; Mpakairi *et al.*, 2020).

Partant des capteurs TM, ETM+ et OLI des satellites Landsat (Landsat-1 à Landsat-8) de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) aux capteurs MSI des satellites Sentinel-2 (S-2) de l'ESA (European Space Agency), les gestionnaires disposent de nos jours d'une multitude de données d'imagerie satellitaire en accès libre et gratuit.

S'agissant des données Landsat, le temps de revisite du satellite de 16 jours (Images OLI et TIRS) ne permet pas d'optimiser les chances de disposer de plusieurs images dans un temps rapproché pour un suivi et pour éviter le problème induit par la présence de nuages, récurrent en contexte tropical. De plus, la résolution de 30 m de ces images constitue une limite pour la cartographie des petites surfaces brûlées. Le développement du programme Copernicus de l'ESA depuis 2015 offre de nouvelles images optiques S-2 avec des améliorations de la résolution spatiale (10 à 60 m) et sur le temps de revisite des satellites (5 jours). Grâce à leurs résolutions spatiales, les images S-2 peuvent faire la distinction entre les feux utilitaires et les feux incontrôlés. Les satellites fournissent plusieurs images S-2 dans un temps court, favorisant ainsi le suivi de la végétation et une meilleure gestion des problèmes induits par la présence de nuages.

Cependant, bien que les images S-2 offrent de meilleures caractéristiques, très peu de travaux de recherche ont été réalisés pour évaluer leur potentiel dans le suivi des feux de végétation des écosystèmes tropicaux terrestres (Verhegghen *et al.*, 2016). La présente étude a été entreprise dans le souci de contribuer à une meilleure connaissance du potentiel des images S-2 pour le suivi des feux de végétation en Afrique tropicale. Elle a eu pour objectif général d'explorer, sur le Togo, les potentialités des images S-2 pour la surveillance et la cartographie des feux de végétation.

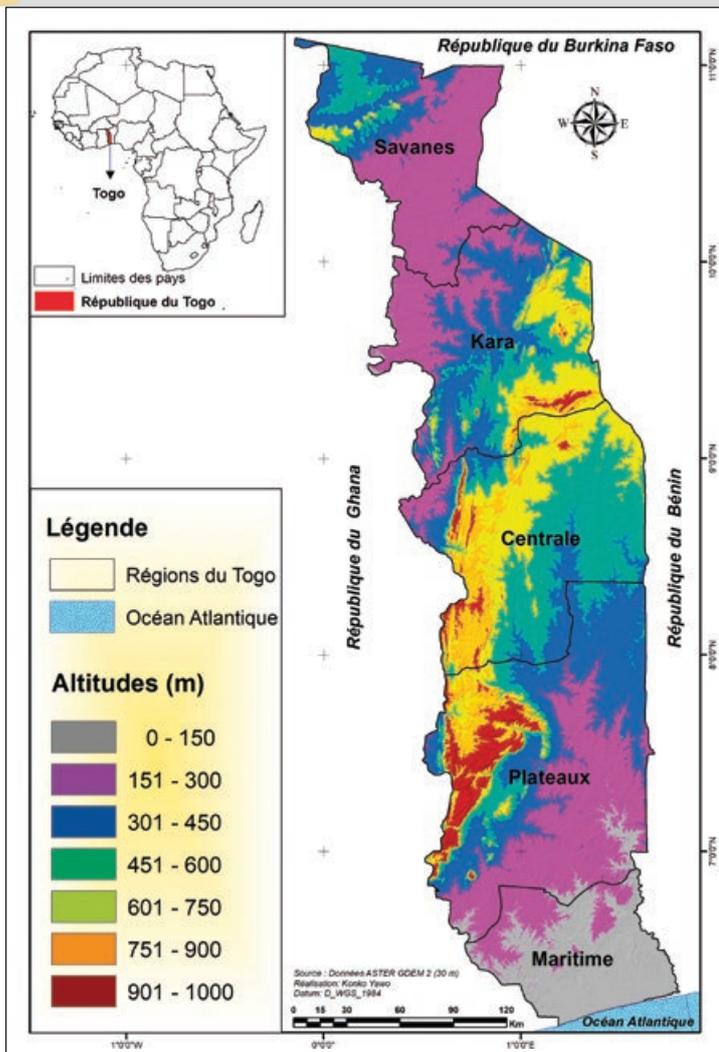


Figure 1. Situation géographique du Togo montrant les régions et le modèle numérique d'altitude.
Geographical location of Togo showing the regions and the digital elevation model.

Quatre objectifs spécifiques ont été déclinés pour cette étude. Le premier était d'évaluer la potentialité des images S-2 dans la restitution des surfaces brûlées. Quant au deuxième, sur la base des images S-2, il s'agissait de tester la performance de la méthode de cartographie des surfaces brûlées suivant les classes d'occupation du sol à partir de l'indice NBR (*Normalized Burn Ratio*) retenu à cause de sa simplicité de mise en œuvre et de sa robustesse (Veraverbeke *et al.*, 2012). Le troisième objectif était de procéder à la cartographie des feux utilitaires et des feux incontrôlés. Enfin, le quatrième consistait à cartographier les classes du couvert végétal brûlé assorti des analyses statistiques. Ce dernier objectif permettrait d'identifier les classes du couvert végétal brûlé.

Matériels et méthode

Zone d'étude

La zone d'étude de cette recherche se situe en République du Togo sur la côte du golfe de Guinée en Afrique de l'Ouest. Le Togo a une superficie de 56 600 km². Il est limité au sud par l'océan atlantique, au nord par le Burkina Faso, à l'est par le Bénin et à l'ouest par le Ghana (Nimon *et al.*, 2020). Le relief du Togo est formé de vastes plaines et de nombreuses collines. Le plus haut sommet est la montagne d'Agou atteignant une altitude de 986 m (figure 1).

Le Togo appartient à la zone intertropicale marquée de deux grands régimes climatiques. Le régime tropical soudanien au nord avec une saison pluvieuse et une saison sèche. Le régime tropical guinéen au sud, caractérisé par deux saisons sèches et deux saisons pluvieuses de durées inégales (Nimon *et al.*, 2020).

Le territoire national est divisé en cinq régions administratives et économiques : région Maritime (6 100 km²), région des Plateaux (16 975 km²), région Centrale (13 317 km²), région de la Kara (11 738 km²), région des Savanes (8 470 km²). Selon, les résultats définitifs du quatrième Recensement général de la population et de l'habitat (RGPH) réalisé du 6 au 21 novembre 2011, la population du Togo était estimée à 6 191 155 habitants.

Outre les régions administratives et économiques, le Togo est subdivisé en cinq zones écologiques. Ces zones sont essentiellement couvertes de savanes (Guelly, 1994). Quelques massifs et îlots forestiers apparaissent par endroits à la faveur de l'humidité, que ce soit en terre ferme, en altitude ou le long des cours d'eau. La biodiversité est très diversifiée de par la variété des écosystèmes aquatiques (cours d'eau, lacs, marécages, eaux maritimes) et terrestres, à savoir les savanes guinéennes et soudaniennes et les forêts (Ern, 1979). On y rencontre les espèces animales inférieures et supérieures, des protozoaires aux vertébrés. Selon le cinquième rapport national sur la diversité biologique du Togo (2009-2014), un total de 4 019 espèces animales a été recensé contre 3 700 en 2009, soit une augmentation de 8 %.

Données utilisées

Les données satellitaires utilisées dans cette étude sont des images optiques S-2 en accès libre. Elles sont disponibles sur la plateforme de l'ESA. Les images S-2 ont été acquises par les satellites Sentinel-2A et Sentinel-2B équipés d'un capteur MSI (*Multi Spectral Instrument*). Le capteur MSI mesure le rayonnement réfléchi de la Terre dans 13 bandes spectrales et dispose d'une résolution spatiale allant de 10 à 60 m. Pour cette étude, les données S-2 acquises avant et après le passage du feu ont été utilisées. La période du 1^{er} novembre 2018 au 30 avril 2019 correspond à la saison des feux de végétation. Le choix des images a été fait sur la base de la méthode du plus proche voisin afin de retenir la meilleure image avec une couverture nuageuse minimale. Le temps de revisite de 5 jours des satellites S-2 a

Tableau I.
Caractéristiques des images S-2 utilisées.
Characteristics of the S-2 images used.

Satellite	Capteur	Dates d'acquisition des images (année_mois_jour)		Résolution spatiale (m)	Numéro de tuile au sol
		Image avant le passage du feu	Image après le passage du feu		
Sentinel-2	MSI	2018_11_30	2019_04_04	10 (10-60)	T_31PBM
		2018_11_08	2019_03_28	10 (10-60)	T_31PBN
		2018_11_23	2019_03_28	10 (10-60)	T_30PZS
		2018_11_23	2019_03_28	10 (10-60)	T_30PZT
		2018_11_23	2019_03_28	10 (10-60)	T_30PZR
		2018_11_30	2019_04_09	10 (10-60)	T_31PCL
		2018_11_30	2019_04_04	10 (10-60)	T_31PBL
		2018_11_30	2019_04_09	10 (10-60)	T_31PBK
		2018_11_30	2019_03_30	10 (10-60)	T_31PCK
		2018_11_30	2019_03_05	10 (10-60)	T_31NBJ
		2018_11_30	2019_03_05	10 (10-60)	T_31NCJ
		2018_12_25	2019_04_09	10 (10-60)	T_31NBH
		2018_12_25	2019_04_09	10 (10-60)	T_31NCH
		2018_12_25	2019_04_09	10 (10-60)	T_31NBS
		2018_12_25	2019_04_09	10 (10-60)	T_31NCG

permis d'avoir une série d'images dans un temps rapproché suffisante pour orienter le choix et contourner le problème des nuages. Les caractéristiques des images utilisées sont présentées dans le tableau I.

Par ailleurs, les données de l'occupation du sol de 2013-2014 issues du traitement des images satellitaires *Rapideye* à 5 m de résolution spatiale fournies par le ministère de l'Environnement ainsi que les données topographiques nationales fournies par la Direction générale de la cartographie à l'échelle 1/50 000^e ont également été retenues comme données de référence.

Traitements des images satellitaires

Prétraitement des images satellitaires

Dans le cadre de cette étude, seules les bandes B2 ($\lambda = 0,490 \mu\text{m}$), B3 ($\lambda = 0,560 \mu\text{m}$), B4 ($\lambda = 0,665 \mu\text{m}$), B8 ($\lambda = 0,842 \mu\text{m}$) et B12 ($\lambda = 2,190 \mu\text{m}$) des images S-2 ont été nécessaires pour le traitement. Le logiciel SNAP (*Sentinel Application Platform*) destiné au traitement des images S-2 a été adopté. Le temps de revisite de 5 jours a constitué un avantage clé pour bénéficier d'une série d'images faiblement ennuagées dans un laps de temps court. La saison des feux de végétation coïncidant avec la saison sèche a également augmenté les chances d'obtenir des images sans nuages. Pour ces raisons, le prétraitement a porté essentiellement sur les opérations de correction radiométrique, de rééchantillonnage de bande, de mosaïquage des bandes et de composition colorée.

La correction radiométrique a servi pour la réduction des effets atmosphériques et le rehaussement de contraste des scènes par la méthode de MERIS avec l'algorithme de correction de Rayleigh (Schroeder *et al.*, 2007). L'opération

de rééchantillonnage de bande a harmonisé la résolution spatiale de la bande B12 sur la résolution spatiale de 10 m des autres bandes B2, B3, B4 et B8 en utilisant l'algorithme « *Nearest neighbour* ». Cet algorithme a l'avantage de préserver les valeurs d'origine des scènes. Les bandes de 10 m ont été retenues pour le rééchantillonnage afin de permettre la cartographie des superficies brûlées inférieures à 0,5 ha (feux utilitaires). Le mosaïquage des bandes a lié les mêmes numéros de bande d'images en une bande unique couvrant tout le Togo. Les bandes d'images avant le passage du feu et après le passage du feu ont été mosaïquées séparément par l'outil « *Mosaicing* ». La composition colorée de bandes en vraies couleurs (proche de la réalité visuelle humaine) a été produite pour permettre une visualisation en couleurs naturelles des images, afin de mieux discriminer la végétation non brûlée et les surfaces brûlées. Cette composition a été effectuée en associant la bande B4 au canal rouge, la bande B3 au canal vert et la bande B2 au canal bleu.

Création de masque d'eau

Les zones aquatiques sont le plus souvent confondues avec les surfaces brûlées sur les indices de végétation utilisés pour la cartographie des feux de végétation (Mallinis *et al.*, 2018). Afin de lever cette confusion, il a été nécessaire de générer un masque pour séparer les zones aquatiques des surfaces brûlées. Plusieurs masques pour la discrimination des zones aquatiques (fleuves, rivières, lacs, lagunes, plans d'eau, etc.) à partir de l'imagerie satellitaire ont été produits et appliqués tels que le NDWI (*Normalized Difference Water Index*) (McFeeters, 1996) et le MNDWI (*Modified Normalized Difference Water Index*) (Wang *et al.*, 2017).

Pour cette étude, l'indice NDWI a été choisi en raison de son efficacité, sa popularité et sa commodité. Le NDWI est calculé ainsi :

$$NDWI = \frac{Vert - PIR}{Vert + PIR} \text{ (équation 1)}$$

où le PIR (proche Infrarouge) est la bande B8 et le vert la bande B3.

Le NDWI maximise la réflectance de l'eau et minimise la réflectance de la végétation et du sol, permettant ainsi une meilleure discrimination des zones aquatiques. En règle générale, avec le NDWI l'eau a des valeurs positives tandis que le sol et la végétation ont une valeur nulle ou négative.

Production des indices NBR avant et après le passage du feu

Plusieurs indices de végétation pour la cartographie des feux de végétation à partir de l'imagerie satellitaire ont été calculés et appliqués : l'indice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) (Tucker, 1979), l'indice BAI (*Burned Area Index*) (Chuvieco *et al.*, 2002), l'indice NBR (*Normalized Burn Ratio*) (Key and Benson, 2006) et l'indice CSI (*Char Soil Index*) (Smith *et al.*, 2007). Dans le cadre de cette étude, l'indice NBR a été retenu à cause de sa simplicité, sa robustesse et sa capacité de mesurer la sévérité des brûlages (Veraverbeke *et al.*, 2012). L'indice NBR avant le passage du feu et l'indice NBR après le passage du feu sont calculés successivement :

$$NBR = \frac{PIR - SWIR}{PIR + SWIR} \text{ (équation 2)}$$

où le PIR fait référence à la bande B8 et le SWIR (infrarouge à ondes courtes) à la bande B12.

Étant donné que l'indice NBR est conçu initialement pour être utilisé sur les images Landsat, sa performance sur les images S-2 a été testée en premier lieu.

Seuillage du delta NBR

L'indice NBR avant le passage du feu et l'indice NBR après le passage du feu obtenus à partir des images S-2 ont été utilisés pour calculer le delta NBR (ΔNBR), lequel permet la mesure de la sévérité des brûlages (Miller *et al.*, 2009 ; Veraverbeke *et al.*, 2010a ; García-Llamas *et al.*, 2019). La formule utilisée pour calculer le ΔNBR est la suivante :

$$\Delta NBR = NBR_{\text{Avant feux}} - NBR_{\text{Après feux}} \text{ (équation 3)}$$

Une valeur élevée de ΔNBR indique des dommages plus graves, tandis que les zones avec des valeurs faibles voire négatives peuvent signifier une surface brûlée ou une repousse après un feu. Pour cette étude, la classification fournie par le portail USGS pour l'interprétation de la sévérité des brûlages a été adoptée avec quelques modifications. Selon cette classification, la sévérité des brûlages est considérée comme faible si ΔNBR est compris entre 0,1 et 0,269, faiblement modérée lorsque ΔNBR est compris entre 0,27 et 0,439, hautement modérée si ΔNBR est compris entre 0,44 et 0,659 et hautement sévère si ΔNBR est compris entre 0,66 et 1,3. Pour cette étude, les valeurs de ΔNBR supérieures au seuil de 0,27 ont été extraites et classées comme « surfaces brûlées » avec la méthode de binarisation après vérification et validation des données de terrain. Ceci se justifie par le fait que la législation togolaise ne dispose pas d'une hiérarchisation pour la sévérité des brûlages.

Calcul des superficies brûlées

L'indice ΔNBR binaire a permis de séparer la classe des surfaces brûlées de la classe des surfaces non brûlées. Le masque d'eau (NDWI) a été utilisé par la même occasion pour exclure la confusion entre les zones aquatiques et les zones brûlées. Par la suite, l'indice ΔNBR a été vectorisé afin de rendre possible la création des fichiers de forme (*shapefile*) (Konko, 2016 ; Atsri *et al.*, 2018) et le calcul des superficies brûlées. Enfin, deux cartes de surfaces brûlées ont été générées. La première est appelée carte des feux utilitaires dont les superficies brûlées sont inférieures à 0,5 ha et la seconde représente la carte des feux incontrôlés avec des superficies brûlées supérieures ou égales à 0,5 ha. Cette catégorisation s'explique par le fait que la loi de la République togolaise décrit dans son code forestier n° 2008-09, articles 26 et 27, deux types de feux de végétation : les feux utilitaires (feux de cultures agricoles et pastorales, de renouvellement de la paille et de nettoyage des champs) et les feux incontrôlés ou incendies de forêts dont les superficies brûlées sont supérieures ou égales à 0,5 ha.

Cartographie du couvert végétal brûlé

Les *shapefiles* des surfaces brûlées par les feux utilitaires et les incendies de forêts ont été utilisés pour extraire les classes du couvert végétal brûlé à partir du *shapefile* de l'occupation du sol de référence fourni par le ministère de l'Environnement du Togo. La technique du « *clipping* » a été adoptée pour cette opération. Par la suite, les superficies ont été calculées à l'aide de la table attributaire.

Méthode de validation des résultats

Sur le plan scientifique, les résultats des traitements des images satellitaires ne deviennent véritablement fiables qu'après une validation menée sur le terrain (ou avec des données de référence) et lorsqu'elles sont accompagnées de statistiques et d'indicateurs pertinents de qualité des résultats. Dans le cadre de cette étude, une première validation a été réalisée pour évaluer la performance du seuil du ΔNBR retenu suivant les classes d'occupation du sol et une seconde validation pour l'ensemble des résultats obtenus à l'issue des traitements. Au total, 683 points ont été retenus pour les contrôles au sol. La distribution des points dans différentes classes d'occupation du sol brûlé a été faite de manière aléatoire avec une contrainte de distance de 100 m entre les points voisins pour éviter toute corrélation (Congalton, 1991). À l'issue des vérifications de terrain, une matrice de confusion a été produite (tableau II).

Cette matrice a servi de soubassement pour le calcul des différents indicateurs de précision jugés pertinents, notamment la précision globale, la précision du producteur, la précision de l'utilisateur, la précision *F-score*, et les erreurs de commission et d'omission. Ces différents indicateurs ont été retenus car ils sont considérés comme plus pertinents que l'indice Kappa pour les validations détaillées des produits cartographiques (Story et Congalton, 1986 ; Rwanga et Ndambuki, 2017 ; Stehman et Foody, 2019).

La précision globale (PG) indique le pourcentage des points bien classés par rapport au nombre total de points contrôlés. Elle représente le rapport entre le nombre total de

Tableau II.
 Matrice de confusion.
 Confusion matrix.

Classes brûlées	Vérités terrain								Total
	Forêts denses	Forêts riveraines	Forêts claires	Plantations	Savanes	Parcs agroforestiers	Zones marécageuses	Cultures et jachères	
Forêts denses	75	1	1	1	3	0	0	5	86
Forêts riveraines	0	75	0	0	3	0	0	3	81
Forêts claires	5	0	76	1	4	2	0	1	89
Plantations	0	0	0	86	0	0	0	4	90
Savanes	0	0	0	1	79	0	0	0	80
Parcs agroforestiers	0	0	0	0	3	80	2	0	85
Zones marécageuses	0	0	0	0	0	0	79	3	82
Cultures et jachères	0	2	0	5	0	0	1	82	90
Total	80	78	77	94	92	82	82	98	683

points corrects (T_{corrects}) et le nombre total de points contrôlés ($T_{\text{contrôlés}}$) (Rwanga et Ndambuki, 2017). La formule utilisée pour calculer la PG est la suivante :

$$PG = \frac{(T_{\text{corrects}})}{(T_{\text{contrôlés}})} \text{ (équation 4)}$$

La précision du producteur (PP) est la probabilité pour un point appartenant à une classe de la vérité terrain d'être correctement classé. Contrairement à la précision globale, il s'agit d'un indicateur de précision par classe qui se calcule en faisant le rapport entre le nombre de points corrects de la colonne de la vérité terrain pour une classe (Δ_{corrects}) et le nombre total de points contrôlés pour la même colonne de classe ($\Delta_{\text{contrôlés}}$) (Story et Congalton, 1986). L'équation 5 indique le calcul de la PP :

$$PP = \frac{(\Delta_{\text{corrects}})}{(\Delta_{\text{contrôlés}})} \text{ (équation 5)}$$

Le complément de la précision de producteur ($1 - PP$) est l'erreur d'omission (Stehman et Foody, 2019). La précision de l'utilisateur (PU) est également un indicateur de précision par classe. Elle est la probabilité pour un point classé dans une classe sur la carte d'appartenir effectivement à cette classe sur le terrain. Elle représente le rapport entre le nombre de points corrects de la ligne de classe sur la carte (U_{corrects}) et le nombre total de points contrôlés pour la même ligne de classe ($U_{\text{contrôlés}}$) (Story et Congalton, 1986). La formule utilisée pour calculer la PU est la suivante :

$$PU = \frac{(U_{\text{corrects}})}{(U_{\text{contrôlés}})} \text{ (équation 6)}$$

Le complément de la précision de l'utilisateur ($1 - PU$) est l'erreur de commission (Stehman et Foody, 2019). La précision *F-Score* (PFS) est l'indicateur de synthèse de la précision utilisateur et de la précision producteur pour évaluer la performance de la méthode de traitement. Elle est donnée par la moyenne géométrique de la précision producteur et de la précision utilisateur :

$$PFS = \frac{(PP + PU)}{2} \text{ (équation 7)}$$

Résultats

Les indicateurs de précision des résultats

Les résultats de la cartographie des feux de végétation ont été validés à partir des données de terrain et de la matrice de confusion. Le tableau III présente les différents indicateurs de précision calculés à partir de la matrice de confusion.

La précision globale des résultats obtenus est de l'ordre de 92,53 %. Pour l'ensemble des classes d'occupation du sol, les précisions du producteur et de l'utilisateur sont supérieures à 80 %. À l'exception de la classe cultures et jachères, les précisions *F-Score* ou les moyennes géométriques entre la précision producteur et la précision utilisateur sont supérieures à 90 %, indiquant un fort rapprochement des valeurs de la carte et des valeurs du terrain et par conséquent une cartographie de qualité. Les erreurs d'omission et de commission sont globalement faibles. Il découle de ces indicateurs de précision que la méthode d'analyse est bonne et que les résultats sont fiables et pourront être mis à disposition des décideurs ou utilisateurs pour exploitation.

Potentialité des images S-2 dans la restitution des ressources en eau et la création de masque d'eau

Le processus de traitement des images S-2 a permis de générer un masque d'eau à partir de l'indice NDWI. Ce masque a servi pour lever les confusions entre les zones aquatiques et les surfaces brûlées. La figure 2 est un extrait de scène couvrant un plan d'eau et ses alentours dans la région des Plateaux. La figure 2a représente l'extrait de l'image composite montrant le potentiel de restitution des plans d'eau sur les images S-2. Les figures 2b et 2c montrent respectivement l'extrait de l'indice NDWI et l'extrait du masque d'eau généré. Le masque d'eau présenté dans la

Tableau III.
Les différents indicateurs de précision calculés.
The different precision indicators calculated.

Classes brûlées	Précisions				F-Score (%)
	Précision producteur (%)	Précision utilisateur (%)	Erreur d'omission (%)	Erreur de commission (%)	
Forêts denses	93,75	87,21	6,25	12,79	90,48
Forêts riveraines	96,15	92,59	3,85	7,41	94,37
Forêts claires	98,70	85,39	1,30	14,61	92,05
Plantations	91,49	95,56	8,51	4,44	93,52
Savanes	85,87	98,75	14,13	1,25	92,31
Parcs agroforestiers	97,56	94,12	2,44	5,88	95,84
Zones marécageuses	96,34	96,34	3,66	3,66	96,34
Cultures et jachères	83,67	91,11	16,33	8,89	87,39
Précision globale = 92,53 %					

figure 2c est d'une bonne qualité et restitue suffisamment les éléments de l'indice NDWI, notamment le plan d'eau et ses contours ainsi que le fleuve Mono, ceci en conformité avec l'image composite (figure 2a). Cela témoigne non seulement de la qualité de l'indice NDWI à partir duquel le masque est généré d'une manière précise, mais également du potentiel des images S-2 dans la restitution des ressources en eau.

Performance de la méthode de l'indice NBR sur les images S-2

Outre le masque d'eau, l'indice NBR a été produit pour permettre la cartographie des feux de végétation. La figure 3 comprend plusieurs extraits de scènes couvrant la montagne de Bassar et ses alentours dans la région de la Kara. Parmi ces extraits figurent les différents NBR générés. Les

figures 3a, 3b et 3c montrent respectivement un extrait de l'indice NBR avant passage du feu, de l'indice NBR après le passage du feu et de l'indice Δ NBR. L'interprétation visuelle de l'indice Δ NBR permet une identification des surfaces brûlées en couleur blanche.

Le produit de Δ NBR a été utilisé pour la cartographie des surfaces brûlées à travers l'extraction des valeurs de Δ NBR supérieures au seuil de 0,27. Le résultat a été ensuite binarisé et vectorisé. Les figures 3d, 3e et 3f offrent respectivement un aperçu des valeurs de Δ NBR > 0,27 (surfaces brûlées) en rouge, de Δ NBR binaire montrant les valeurs de Δ NBR > 0,27 en rouge et de Δ NBR > 0,27 binaire vectorisé. La comparaison visuelle de ces trois figures illustre l'efficacité de la méthodologie utilisée pour l'extraction des surfaces brûlées. Cette efficacité est confirmée par l'indicateur de la précision globale qui est de l'ordre 92,53 %.

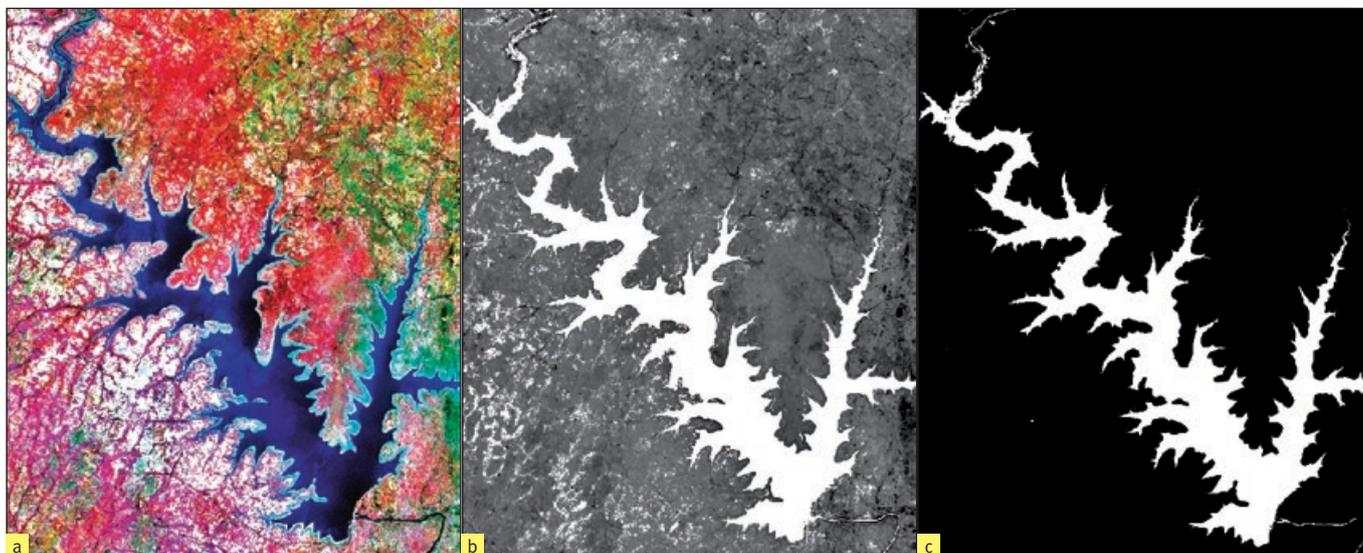


Figure 2.

Aperçu de la potentialité des images S-2 dans la restitution des ressources en eau et la création de masque. (a) Image composite du 30 novembre 2018 montrant un plan d'eau. (b) Indice NDWI. (c) Masque d'eau généré à partir de l'indice NDWI.
Overview of the potential of S-2 images in the restitution of water resources and mask creation. (a) Composite image of 30 November 2018 showing a body of water. (b) NDWI index. (c) Water mask generated from the NDWI index.

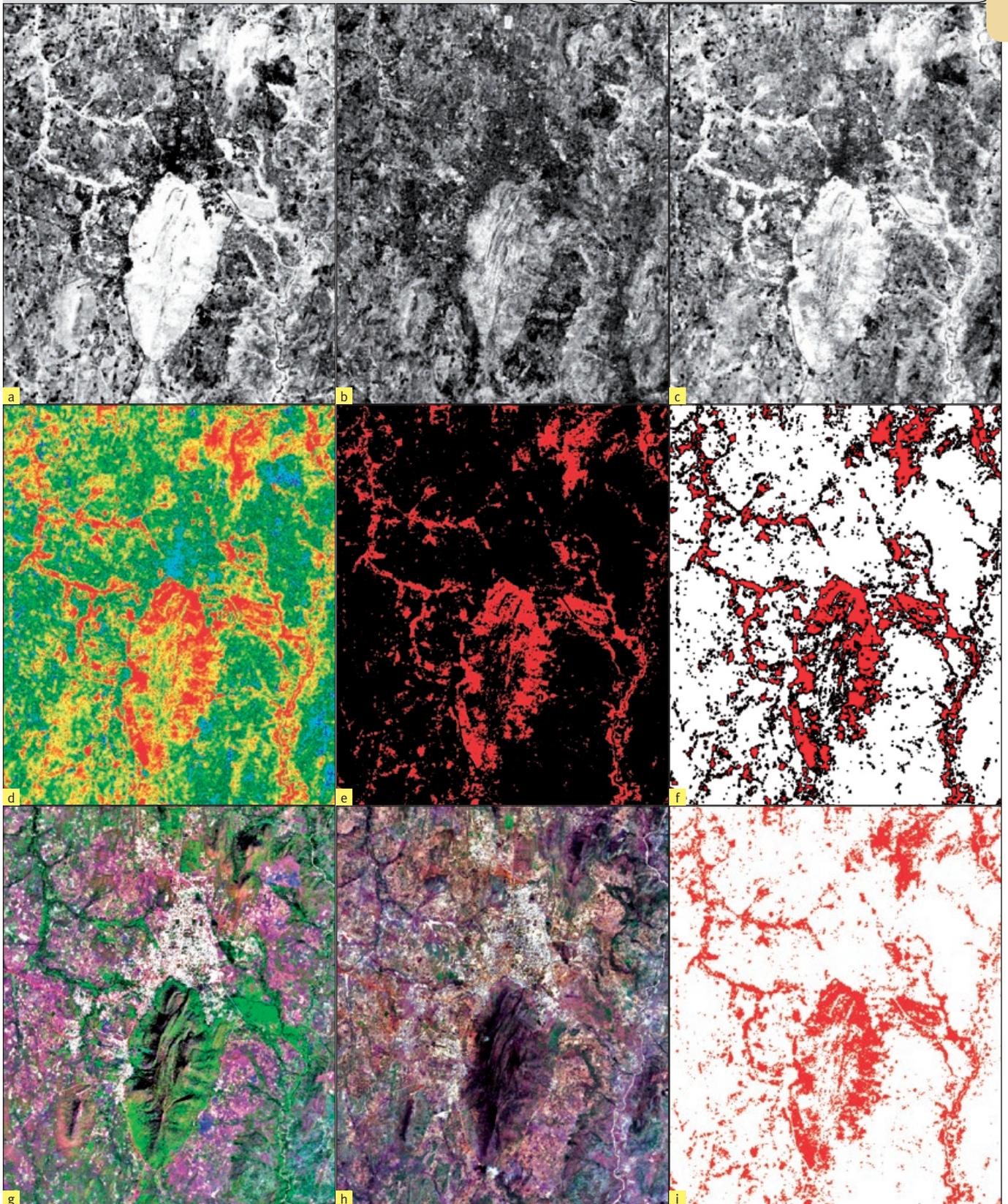


Figure 3.

Quelques extraits de scènes couvrant la montagne de Bassar et ses alentours dans la région de la Kara. (a) NBR avant le passage du feu. (b) NBR après le passage du feu. (c) ΔNBR . (d) Image de ΔNBR montrant les valeurs de $\Delta NBR > 0,27$ (surfaces brûlées) en rouge. (e) Image ΔNBR binaire montrant les valeurs de $\Delta NBR > 0,27$ en rouge. (f) ΔNBR binaire vectorisé. (g) Image composite avant le passage du feu. (h) Image composite après le passage du feu. (i) Surfaces brûlées extraites en rouge.

Some extracts from scenes covering the Bassar mountain and its surroundings in the Kara region. (a) NBR before the passage of fire. (b) NBR after the passage of fire. (c) ΔNBR . (d) Image from ΔNBR showing the values of $\Delta NBR > 0.27$ (burnt areas) in red. (e) Binary image ΔNBR showing the values of $\Delta NBR > 0.27$ in red. (f) ΔNBR binary vectorised. (g) Composite image before the passage of the fire. (h) Composite image after the passage of the fire. (i) Burnt surfaces extracted in red.

Potentialité des images S-2 pour la cartographie des feux de végétation

Désirant mettre en confiance les décideurs et les utilisateurs sur la qualité des données de la présente étude, des extraits de scènes ont été présentés côte à côte pour une appréciation visuelle de l'efficacité du résultat issu de la démarche méthodologique, en plus des indicateurs de précision. Les figures 3g, 3h et 3i illustrent respectivement la situation avant le passage du feu, la situation après le passage de feu et les surfaces brûlées cartographiées. L'interprétation visuelle de ces extraits de scènes permet une discrimination claire entre la couverture végétale non brûlée en vert (figure 3g), les surfaces totalement brûlées en marron (figure 3h) et les surfaces brûlées cartographiées en rouge (figure 3i). Cette interprétation permet de mettre en exergue, la potentialité des images S-2 pour la détection et la cartographie des surfaces brûlées. Il découle de ces extraits de scènes que les images S-2 disposent du potentiel pour la restitution de la couverture végétale verte, des surfaces brûlées et aussi d'autres éléments de surface utiles pour la mise en œuvre des mesures de protection. Il s'agit notamment du relief, des habitations, des zones de culture, des routes et même de petites pistes identifiables sur les scènes présentées (figure 3g et 3h).

L'étude a également permis de cartographier deux types de feux de végétation, les feux utilitaires et les feux incontrôlés. Les figures 4a et 4b représentent respectivement des extraits des feux utilitaires (inférieurs à 0,5 ha) et des feux incontrôlés (supérieurs ou égaux à 0,5 ha).

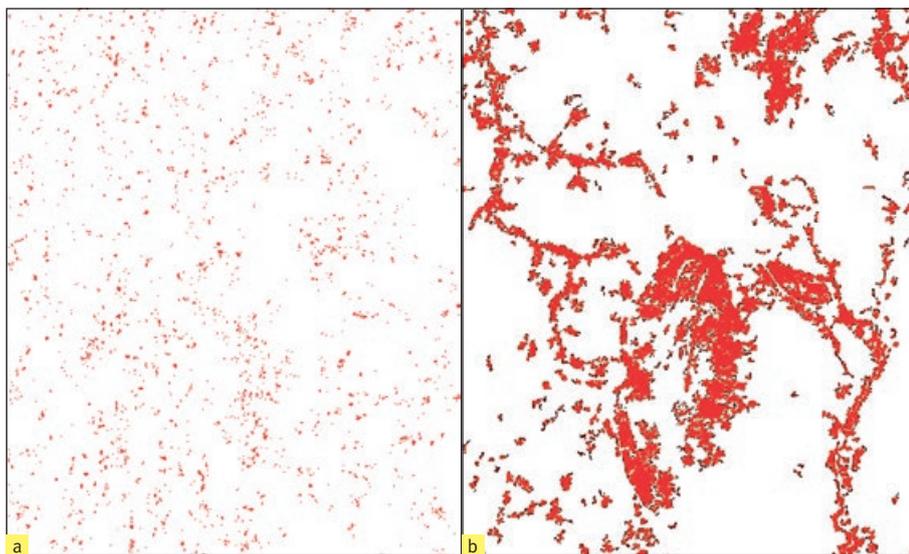


Figure 4.
Extraits des deux types de feux de végétation.
(a) Feux utilitaires (SB < 0,5 ha).
(b) Feux incontrôlés (SB ≥ 0,5 ha).
Extracts from the two types of vegetation fires.
(a) Utility fires (SB < 0.5 ha).
(b) Uncontrolled fires (SB ≥ 0,5 ha).

Distribution spatiale des feux utilitaires

La distribution spatiale des feux utilitaires et le couvert végétal brûlé sont représentés par la figure 5. L'analyse qualitative permet de déduire que les feux utilitaires s'opèrent sur toute l'étendue du territoire national et dans toutes les régions du pays (figure 5a). Le couvert végétal brûlé par les feux utilitaires est composé essentiellement des cultures et jachères, savanes, forêts claires, forêts riveraines, parcs agroforestiers, zones marécageuses, forêts denses et plantations (figure 5b).

L'analyse quantitative montre que les surfaces brûlées par les feux utilitaires représentent 21,75 %, soit 1 278,73 km². La figure 6 illustre la répartition des superficies brûlées entre les différentes régions. Concernant les feux utilitaires, il découle des résultats que la région de la Kara, la région des Plateaux et la région Centrale enregistrent les valeurs les plus élevées. Les superficies brûlées correspondantes sont respectivement de 337,64 km², 316,13 km² et de 301,71 km² (respectivement 5,74 %, 5,38 % et 5,13 %). La région des Savanes et la région Maritime sont les moins touchées par les feux utilitaires (respectivement 1,95 % et 3,55 %).

Les statistiques montrent également que le couvert le plus impacté par les feux utilitaires est composé essentiellement des cultures et jachères (7,08 %), savanes (6,10 %), forêts claires (3,85 %), forêts riveraines (2,35 %). Les parcs agroforestiers, les zones marécageuses, les forêts denses et les plantations sont moins touchés par les feux utilitaires avec des proportions de l'ordre de 0,34 %, 0,47 %, 0,48 % et 1,09 %, respectivement (figure 7).

Distribution spatiale des feux incontrôlés

La répartition géographique des feux incontrôlés et le couvert végétal brûlé sont représentés dans la figure 8. L'interprétation visuelle a permis de constater que les feux incontrôlés s'opèrent sur toute l'étendue du territoire national avec une variété de densités dans les différentes régions du pays (figure 8a). Le couvert végétal brûlé par les feux incontrôlés est composé essentiellement des savanes, cultures et jachères, plantations, forêts riveraines, forêts claires, forêts denses, parcs agroforestiers et zones marécageuses (figure 8b).

L'analyse statistique des surfaces brûlées par les feux incontrôlés montre qu'elles représentent 78,25 %, soit 4 599,27 km². La figure 6 retrace la répartition des feux incontrôlés par région. Les résultats révèlent que la région de la Kara et la région des Savanes sont les plus exposées à ces feux. Les deux régions enregistrent respectivement des superficies brûlées de 1 491,56 km² et de 1 317,54 km² correspondant respectivement à 25,38 % et à 22,41 %. La région Centrale et la région des Plateaux sont

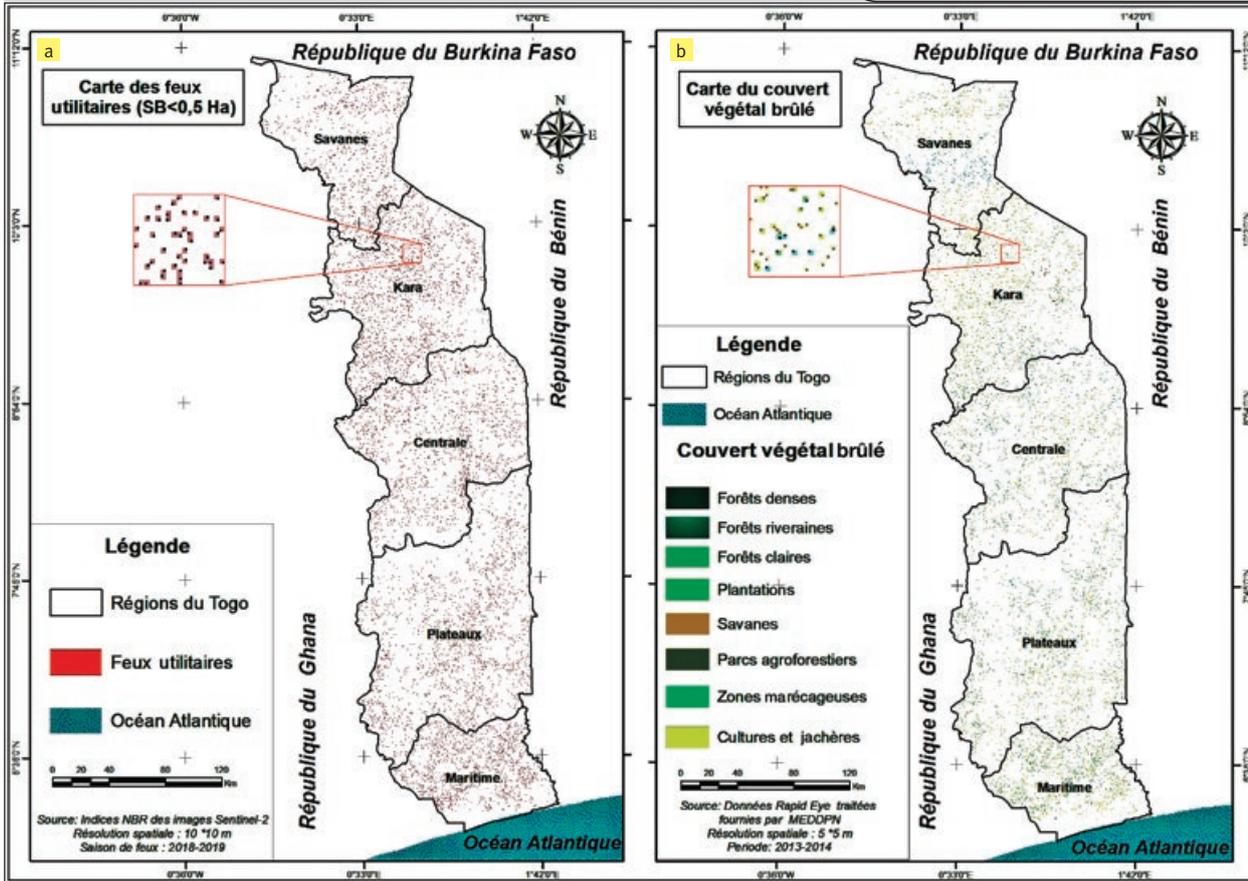


Figure 5. Distribution spatiale des feux utilitaires. (a) Carte des feux utilitaires. (b) Carte des types de couvert végétal brûlés.
 Spatial distribution of utility fires. (a) Map of utility fires (in red). (b) Map of burnt vegetation cover types.

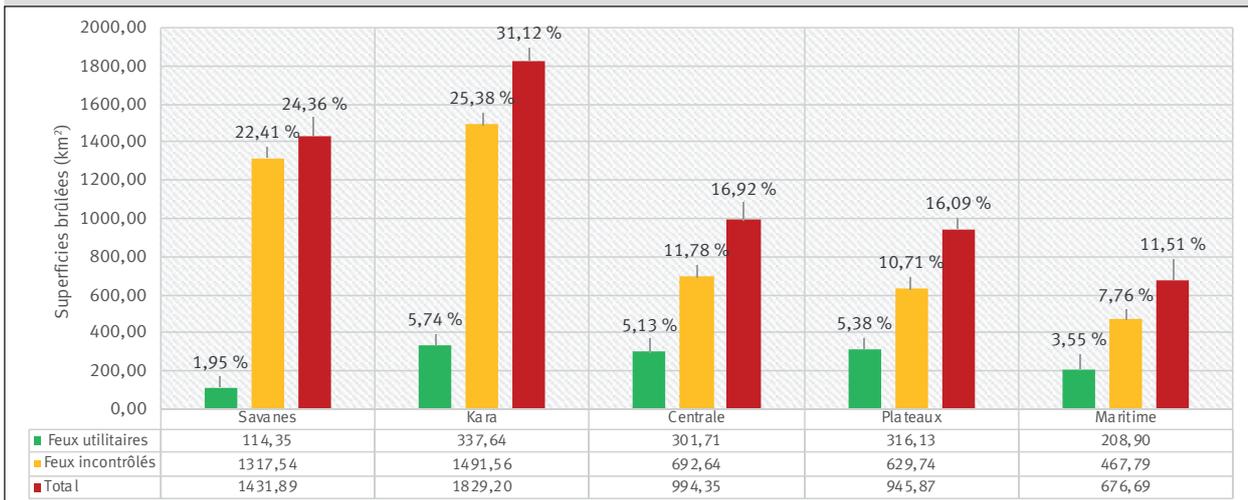


Figure 6. Répartition de l'ensemble des surfaces brûlées par les feux utilitaires (FU) et les feux incontrôlés (FI) par région.
 Distribution of all areas burnt by utility fires (FU) and uncontrolled fires (FI) by Region.

moyennement touchées par ces feux avec des pourcentages de l'ordre de 11,78 % et 10,71 %. Quant à la région Maritime, elle est touchée à 7,96 %. La figure 7 illustre la répartition des superficies du couvert végétal brûlées par les feux incontrôlés. Les résultats indiquent que les savanes, les cultures, les jachères et les plantations sont les plus impactées par les incendies

de forêts avec des pourcentages variés de l'ordre de 27,02 %, 17,40 % et 13,50 %, respectivement. Le couvert végétal moyennement touché est composé des forêts riveraines (10,67 %), des forêts claires (10,58 %) et des forêts denses (8,14 %). Le couvert végétal faiblement affecté est constitué des parcs agroforestiers (4,26 %) et des zones marécageuses (2,39 %).

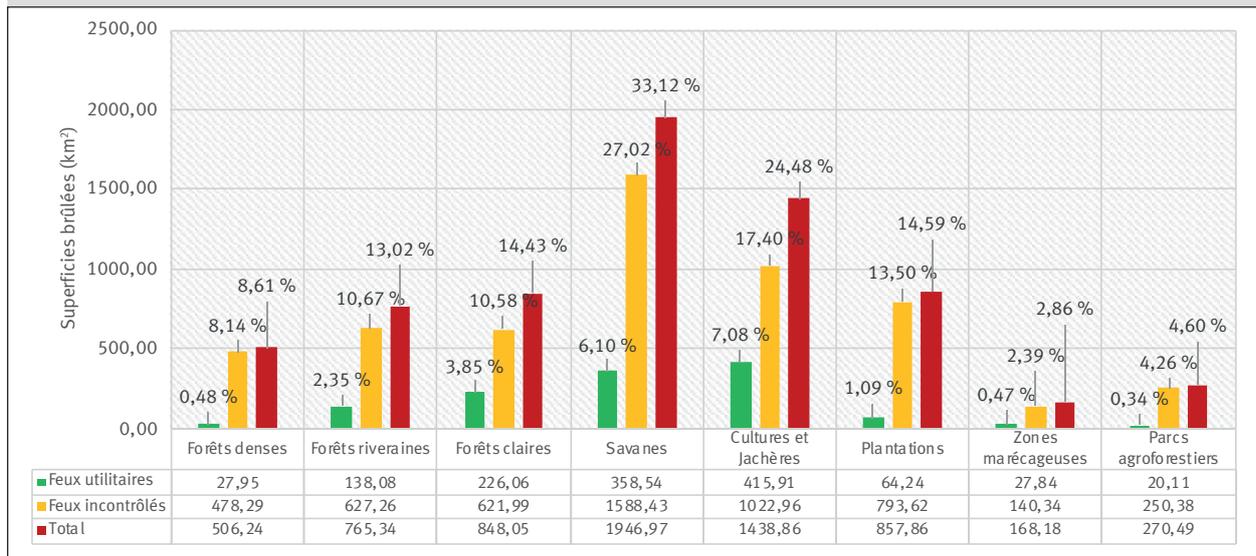


Figure 7.
Répartition de l'ensemble des superficies du couvert végétal brûlé par les feux utilitaires (FU) et les feux incontrôlés (FI).
Distribution of the total area of vegetation cover burned by utility fires (FU) and uncontrolled fires (FI).

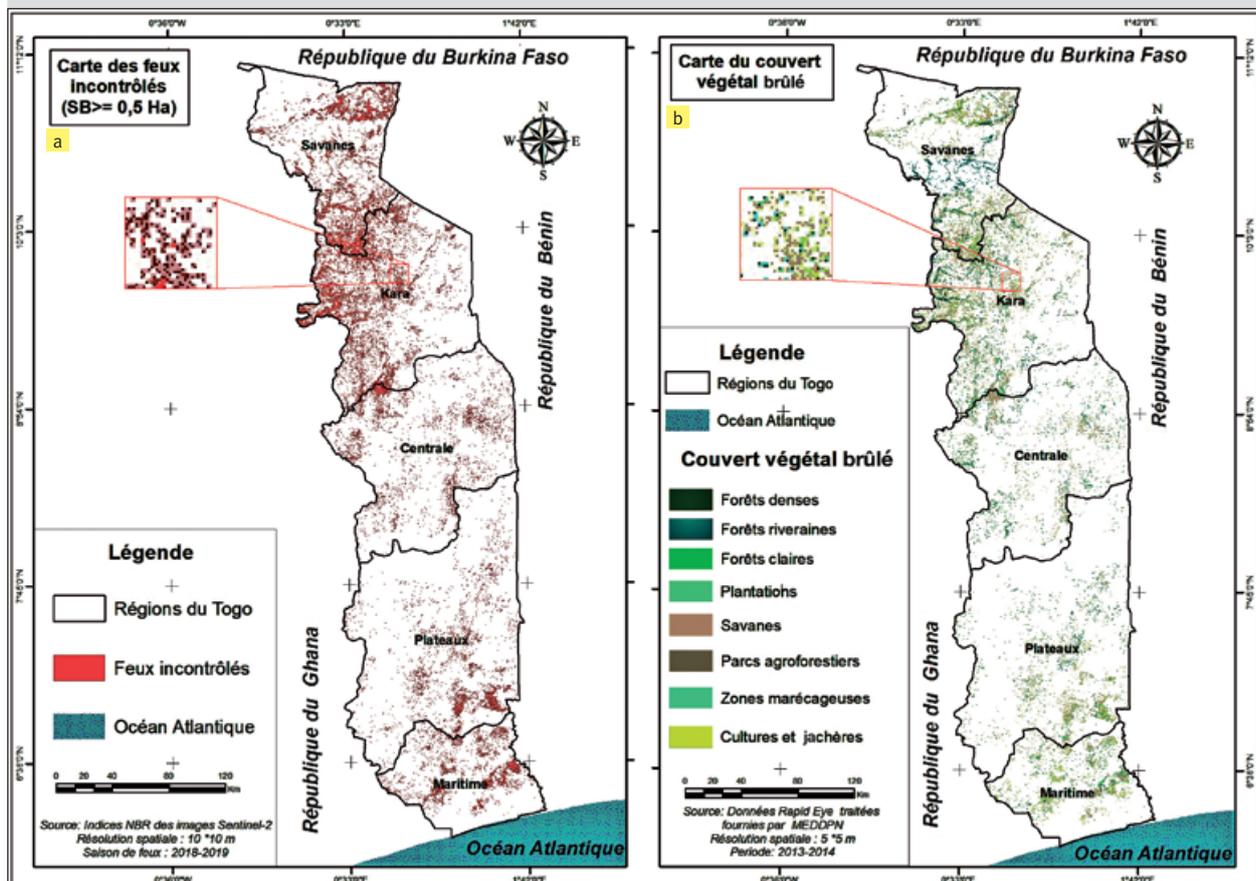


Figure 8.
Distribution spatiale des feux incontrôlés. (a) Carte des feux incontrôlés. (b) Carte du couvert végétal brûlé.
Spatial distribution of uncontrolled fires. (a) Map of uncontrolled fires (in red). (b) Map of burnt vegetation cover.

Distribution spatiale de l'ensemble des surfaces brûlées

Les distributions spatiales de l'ensemble des surfaces brûlées (feux utilitaires et feux incontrôlés) et de l'ensemble du couvert végétal brûlé pour la saison des feux 2018-2019 sont représentées dans la figure 9. Il découle de l'analyse visuelle que les feux de végétation se produisent sur toute l'étendue du territoire national (figure 9a) et affectent une multitude de classes du couvert végétal (figure 9b).

Les statistiques des surfaces touchées par l'ensemble des feux de végétation sont consignées dans la figure 6. À l'échelle nationale, les feux utilitaires représentent 21,75 % des surfaces alors que les incendies de forêts en concernent 78,25 %. Sur le plan régional, la région de la Kara et la région des Savanes restent les plus exposées à ce phénomène. Les deux régions enregistrent des superficies brûlées de 1 829,20 km² et de 1 431,89 km², respectivement. Les pourcentages correspondants sont de 31,12 % et 24,36 %. La région Centrale et la région des Plateaux sont moyennement touchées avec des pourcentages de 16,92 % et de 16,09 % respectivement. La région Maritime est faiblement touchée par les feux (11,51 %). Les superficies du couvert végétal brûlées par l'ensemble des feux apparaissent dans la figure 7. Les résultats montrent que les savanes, les

cultures et jachères sont les plus impactées par l'ensemble des feux (33,12 % et 24,48 %, respectivement). Le couvert végétal moyennement touché est composé des plantations (14,59 %), des forêts claires (14,43 %) et des forêts riveraines (13,02 %). Le couvert végétal faiblement affecté concerne les forêts denses (8,61 %), les parcs agroforestiers (4,60 %) et les zones marécageuses (2,86 %).

Discussion

L'interprétation visuelle des images S-2 en coloration naturelle a permis de montrer le potentiel des images S-2 pour la détection des surfaces brûlées. Il découle des analyses que les images S-2 sont d'une qualité satisfaisante pour permettre une bonne visualisation de la végétation non brûlée et des surfaces brûlées. Selon les travaux de recherche de Konko *et al.* (2018b) et de Labib et Harris (2018), les capteurs MSI du satellite Sentinel-2 présentent de bonnes performances dans la restitution des scènes avec une amélioration de la lisibilité des images et de la résolution spatiale par rapport à d'autres systèmes imageurs fournissant des données similaires à accès libre, notamment le système Landsat.

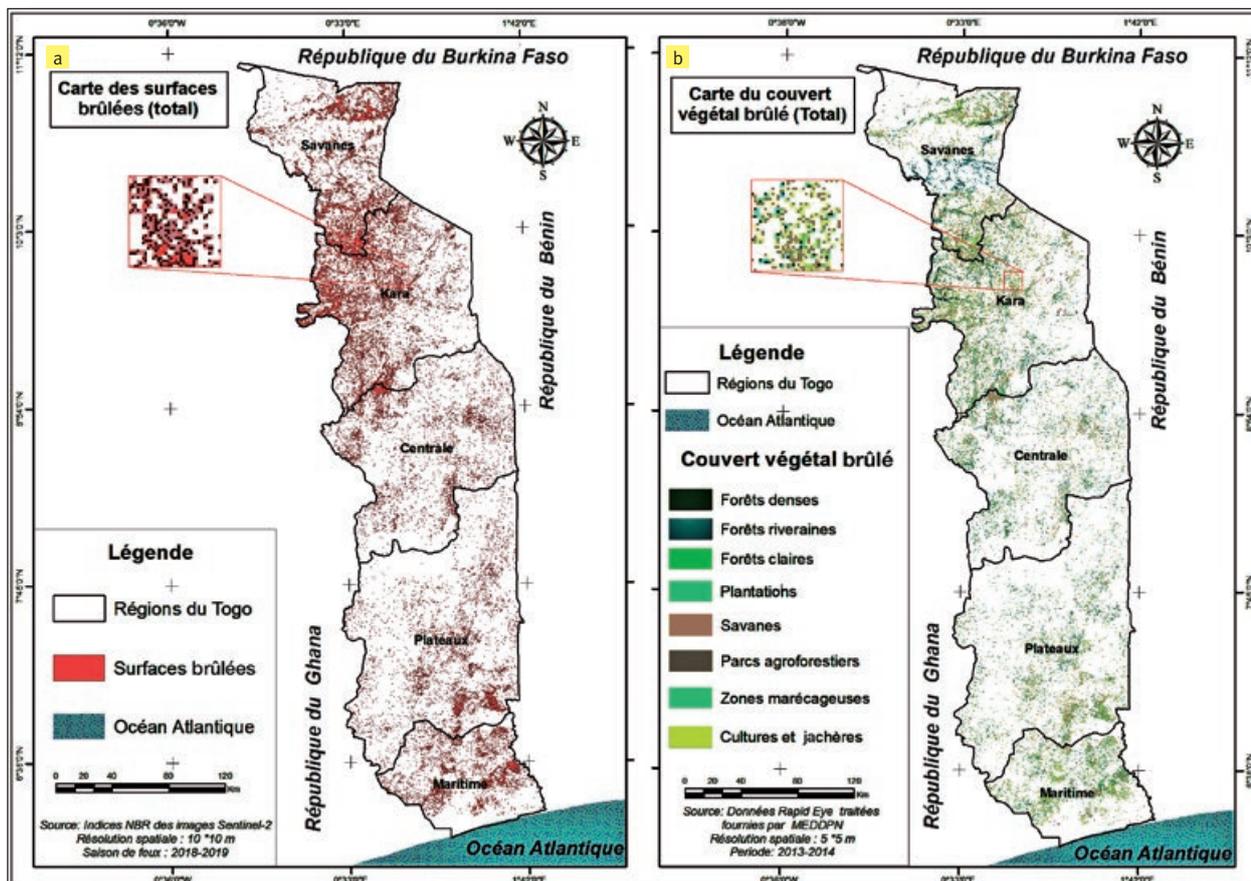


Figure 9. Distribution spatiale de l'ensemble des feux de végétation. (a) Carte des surfaces brûlées. (b) Carte du couvert végétal brûlé.
 Spatial distribution of all vegetation fires. (a) Map of burnt surfaces. (b) Map of burnt vegetation cover.

Les résultats sur la potentialité des images S-2 dans la restitution des ressources en eau et la création de masque d'eau sont encourageants. Ces performances ont été également discutées dans les travaux de recherche de Konko *et al.* (2018a) en contexte tropical, dont les auteurs ont conclu que les images S-2 disposent d'une grande potentialité pour la discrimination des eaux de surface à partir de l'indice NDWI. Toutefois, ces auteurs soulèvent le problème des nuages, qui constituent une contrainte majeure en contexte tropical.

L'indice Δ NBR obtenu dans le cadre de cette étude est d'une bonne qualité, permettant ainsi une cartographie de qualité des surfaces brûlées. Selon Keeley (2009), le Δ NBR est un excellent indicateur pour l'identification des zones brûlées et la mesure des brûlages. Les résultats obtenus avec l'indice Δ NBR témoignent de la qualité des données S-2. Ces données présentent, en effet, de bonnes performances avec une bonne lisibilité des scènes pour l'identification des surfaces brûlées.

Outre la qualité des images S-2, la méthode de l'indice NBR utilisée a joué également un rôle essentiel dans l'extraction précise des surfaces brûlées suivant les classes d'occupation du sol. La précision globale des résultats obtenus est de l'ordre de 92,53 %. À l'exception de la classe cultures et jachères, les précisions *F-Score* sont supérieures à 90 % pour l'ensemble des classes d'occupation du sol. Il découle de ces indicateurs de précision que la méthode d'analyse est bonne et que les résultats sont exploitables. Les précisions obtenues pour cette étude sont similaires à celles fournies par Mpakairi *et al.* (2020) au Zimbabwe. En effet, ces auteurs ont aussi utilisé l'indice NBR et ont trouvé une précision de l'ordre de 91 % pour les classes de forêts et de 76 % pour la classe des arbustes. Cette classe présente les mêmes caractéristiques que la classe des cultures et jachères dont la précision *F-Score* est de 87,39 % dans le cadre de la présente étude. De plus, la performance de l'indice NBR varie suivant les types d'occupation du sol. L'indice NBR est moins performant pour les classes les moins densément couvertes de végétation. Il y a donc nécessité d'utiliser d'autres indices spectraux prenant en compte la réflectance du sol pour la cartographie des surfaces brûlées des classes les moins couvertes par la végétation.

Les statistiques à l'échelle nationale des surfaces brûlées par l'ensemble des feux de végétation montrent que les feux utilitaires représentent seulement 21,75 % des superficies contre 78,25 % pour les feux incontrôlés. Au Togo, les feux utilitaires sont courants pour le nettoyage des champs, le pastoralisme et le renouvellement de la paille. Le faible pourcentage des surfaces brûlées par ces feux utilitaires s'explique par le fait qu'ils échappent souvent au contrôle humain, gagnent du terrain et deviennent des feux incontrôlés. Le taux élevé des surfaces brûlées par les feux incontrôlés confirme la difficulté de maîtrise des feux utilitaires. Sur le plan régional, la région de la Kara et la région des Savanes restent les plus exposées aux feux. Ceci pourrait s'expliquer par la sévérité de la saison sèche dans les régions septentrionales et aussi par la structure et la composition du paysage.

En ce qui concerne le couvert végétal brûlé pour l'ensemble des feux, les résultats révèlent que les savanes, les cultures et jachères sont les plus impactées (33,12 %



Photo 2.

Aperçu d'une zone savanicole brûlée pour le renouvellement de la paille dans la région Centrale.

Overview of a burnt savannah area for straw renewal in the Central region.

Photo Y. Konko.



Photo 3.

Vue d'une portion de la forêt communautaire d'Alibi brûlée dans la région Centrale.

View of a portion of the burnt Alibi community forest in the Central region.

Photo Y. Konko.

et 24,48 %, respectivement). Les pourcentages élevés de ces formations brûlées s'expliquent par le fait qu'elles contiennent beaucoup d'herbacées, couvrent de vastes étendues et sont omniprésentes dans toutes les régions du pays. En saison sèche, un petit feu permet d'embraser une grande surface. En termes d'utilisation, les habitants mettent le feu dans les savanes pour l'agriculture, pour la chasse des animaux sauvages et pour le renouvellement de la paille pour le pastoralisme. La photo 2 est une vue d'une zone savanicole brûlée pour le renouvellement de la paille dans la région Centrale. Dans les zones de cultures et jachères, les populations locales ont recours au feu pour le défrichage et le nettoyage des champs.

Les résultats de cette étude montrent également que les forêts denses (8,61 %), les parcs agroforestiers (4,60 %) et les zones marécageuses (2,86 %) sont faiblement affectés par les feux. S'agissant des forêts denses, elles sont peu représentées à l'échelle nationale, et sont souvent l'objet de lieux de culte et ainsi protégées par la population (Kokou et Sokpon, 2006 ; Konko *et al.*, 2018b). La strate inférieure des forêts denses est également dépourvue d'herbacées, rendant difficile la propagation des feux. Les feux observés dans des forêts denses sont, dans la plupart des cas, des feux sauvages. La photo 3 est un aperçu d'une portion de la forêt communautaire d'Alibi brûlée dans la région Centrale.

Le pourcentage faible des parcs agroforestiers et des zones marécageuses brûlés ne signifie pas que ces formations ne sont pas touchées par les feux, mais plutôt qu'elles sont localisées dans certaines régions et que les statistiques présentées ici le sont à l'échelle nationale. En effet, les parcs agroforestiers brûlés se rencontrent beaucoup plus dans la région des Savanes alors que les zones marécageuses brûlées en saison sèche sont prépondérantes dans la région Maritime. Les deux types de formations sont exposés aux feux de végétation.

L'ensemble des feux de végétation enregistrés au Togo pour la saison des feux 2018-2019 a permis le brûlage de 5877,99 km² du couvert végétal, soit 10,39 % du territoire national. Ces feux de brousse se répercutent négativement sur les efforts de conservation et de restauration de la biodiversité augmentant ainsi les émissions de gaz à effet de serre. Selon certains auteurs, ils dégradent les écosystèmes, modifient le paysage et perturbent la biocénose et l'écologie des populations (Bowman *et al.*, 2009 ; Yue *et al.*, 2015 ; Lewis *et al.*, 2015 ; Konko, 2016).

Conclusion

La présente étude a permis d'explorer la potentialité des images S-2 pour la détection des surfaces brûlées, la cartographie des feux utilitaires et des feux incontrôlés en Afrique tropicale. Elle a également testé la performance de la méthode de cartographie des feux de végétation à partir de l'indice NBR initialement conçu pour les images Landsat et évalué la biomasse végétale brûlée. Les résultats révèlent que les images Sentinel-2 présentent du potentiel dans la restitution des surfaces brûlées. La performance de la méthode de l'indice NBR sur les images S-2 est satisfaisante. La cartographie des feux de végétation montre que les surfaces brûlées par les feux utilitaires représentent 21,75 % contre 78,25 % pour les feux incontrôlés. L'ensemble des feux de végétation enregistrés au Togo pour la saison des feux 2018-2019 a malheureusement occasionné la perte de 5 878 km² du couvert végétal composé majoritairement des savanes (33,12 %), des cultures et jachères (24,48 %), des plantations (14,59 %), des forêts claires (14,43 %) et des forêts riveraines (13,02 %). Ces feux de végétation se répercutent négativement sur les efforts de conservation et de restauration de la biodiversité augmentant ainsi les émissions atmosphériques des gaz à effet de serre, et contribuant finalement au réchauffement climatique. Les résultats obtenus constituent des éléments tangibles pour le suivi, la sensibilisation, l'élaboration des plans d'aménagement, de prévention et de gestion des feux. En bref, pour la mise en œuvre des mesures d'adaptation et d'atténuation.

Remerciements

Cette recherche n'a reçu aucune subvention spécifique de la part des organismes du secteur public et commercial. Nous remercions l'ONG APEDD Togo qui nous a accordé son soutien pour les investigations sur le terrain. Merci également à M. NANGUE Kombaté Bouaman Gaston pour sa contribution dans la collecte des données de terrain.

Références

- Afelu B., 2016. Contribution à la gestion des feux de végétation au Togo. Thèse de doctorat, Université de Lomé, Togo, 177 p.
- Atsri H. K., Konko Y., Cuni-Sanchez A., Abotsi K. E., Kokou K., 2018. Changes in the West African forest-savanna mosaic, insights from central Togo. *Plos One*, 13v (10): e0203999. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203999>
- Bartalev S. A., Egorov V. A., Loupian E. A., Uvarov I. A., 2007. Multi-year circumpolar assessment of the area burnt in boreal ecosystems using SPOT-VEGETATION. *International Journal of Remote Sensing*, 28 (6): 1397-1404. <https://doi.org/10.1080/01431160600840978>
- Bastarrika A., Chuvieco E., Pilar Martín M., 2011. Mapping burned areas from Landsat TM/ETM+ data with a two-phase algorithm: Balancing omission and commission errors. *Remote Sensing of Environment*, 115 (4): 1003-1012. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.12.005>
- Boschetti M., Stroppiana D., Brivio P. A., 2010. Mapping burned areas in a Mediterranean environment using soft integration of spectral indices from high resolution satellite images. *Earth Interactions*, 14 (17): 1-20. <https://doi.org/10.1175/2010EI349.1>
- Bowman D. M. J. S., Balch J. K., Artaxo P., Bond W. J., Carlson J. M., Cochrane M. A., *et al.*, 2009. Fire in the Earth system. *Science*, 324 (5926): 481-484. <https://doi.org/10.1126/science.1163886>
- Chuvieco E., Martín M. P., Palacios A., 2002. Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination. *International Journal of Remote Sensing*, 23 (23): 5103-5110. <https://doi.org/10.1080/01431160210153129>
- Chuvieco E., Englefield P., Trischenko A., Lio Y., 2008. Generation of long time series of burn area maps of the boreal forest from NOAA-AVHRR composite data. *Remote Sensing of Environment*, 112 (5): 2381-2396. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.11.007>
- Chuvieco E., Aguado I., Yebra M., Nieto H., Salas J., Pilar Martín M., *et al.*, 2010. Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies. *Ecological Modelling*, 221 (1): 46-58. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.11.017>
- Chuvieco E., Lizundia-Loiola J., Pettinari M. L., Ramo R., Padilla M., Tansey K., Mouillot F., *et al.*, 2018. Generation and analysis of a new global burned area product based on MODIS 250 m reflectance bands and thermal anomalies. *Earth System Science Data*, 10 (4): 2015-2031. <https://doi.org/10.5194/essd-10-2015-2018>
- Chuvieco E., Mouillot F., Van der Werf G. R., San Miguel J., Tanase M., Koutsias N., *et al.*, 2019. Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation. *Remote Sensing of Environment*, 225 (1): 45-64. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.013>

- Congalton R. G., 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37 (1): 35-46. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-B](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-B)
- Doerr S. H., Shakesby R. A., Blake W. H., Chafer C. J., Humphreys G. S., Wallbrink P. J., 2006. Effects of differing wildfire severities on soil wettability and implications for hydrological response. *Journal of Hydrology*, 319 (1-4): 295-311. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.038>
- Ern H., 1979. Die Vegetation Togos. Gliederung, Gefährdung, Erhaltung. Willdenowia, 9: 295-312. <https://www.jstor.org/stable/3995654?seq=1>
- García-Llamas P., Suárez-Seoane S., Fernández-Guisuraga J. M., Fernández-García V., Fernández-Manso A., Quintano C., *et al.*, 2019. Evaluation and comparison of Landsat 8, Sentinel-2 and Deimos-1 remote sensing indices for assessing burn severity in Mediterranean fire-prone ecosystems. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 80: 137-144. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.04.006>
- González F. E., Ruiz J. M., Acosta F. M., 2013. Manuel de télé-détection spatiale. TELECAN. Université de Las Palmas, Gran Canaria, 337 p. https://www.grss-ieee.org/wp-content/uploads/2014/07/FR_TUTORIAL_COMPLETO.pdf
- Guelly K. A., 1994. Les savanes de la zone forestière subhumide du Togo. Thèse de doctorat. Université Pierre Marie-Curie, Paris VI, France. <http://www.theses.fr/1994PA066589>
- IPCC, 2018. Global warming of 1.5 °C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Cambridge, UK, Cambridge University Press, 562 p. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- Kamau P. N., Medley K. E., 2014. Anthropogenic fires and local livelihoods at Chyulu Hills, Kenya. *Landscape and Urban Planning*, 124: 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.01.010>
- Keeley J. E., 2009. Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, 18 (1): 116-126. <https://doi.org/10.1071/WF07049>
- Key C., Benson N., 2006. Landscape assessment: Ground measure of severity, the Composite Burn Index, and remote sensing of severity, the Normalized Burn Index. *In*: Lutes D., Keane R., Caratti J., Key C., Benson N., Sutherland S., *et al.* (eds). FIRE-MON: Fire effects monitoring and inventory system. Fort Collins, CO, USA, USDA Forest Service, Rocky Mountains Research Station, General Technical Report RMRS-GTR-164-CD, LA 1-51. https://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_gtr164.pdf
- Knorr W., Jiang L., Arneeth A., 2016. Climate, CO₂ and human population impacts on global wildfire emissions. *Biogeosciences*, 13 (1): 267-282. <https://doi.org/10.5194/bg-13-267-2016>
- Kokou K., Sokpon N., 2006. Les forêts sacrées du couloir du Dahomey. *Bois et Forêts des Tropiques*, 288 : 15-23. <https://revues.cirad.fr/index.php/BFT/article/view/20312>
- Konko Y., 2016. Contribution of Remote Sensing and GIS to the Integrated Management of Community Forest Resources in the Bas-Mono Valley (South-East Togo). Master's Thesis, Post University Regional School of Integrated Management of Tropical Forests and Territories, Kinshasa, Democratic Republic of Congo, 94 p. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20280.70403>
- Konko Y., Bagaram B., Julien F., Akpamou K. G., Kokou K., 2018a. Multitemporal Analysis of Coastal Erosion Based on Multisource Satellite Images in the South of the Mono Transboundary Biosphere Reserve in Togo (West Africa). *Open Access Library Journal*, 5 (4): e4526. <https://doi.org/10.4236/oalib.1104526>
- Konko Y., Rudant J. P., Akpamou G. K., Noumonvi K. D., Kokou K., 2018b. Spatio-Temporal Distribution of Southeastern Community Forests in Togo (West Africa). *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 6 (7): 51-65. <https://doi.org/10.4236/gep.2018.67004>
- Konko Y., Okhimambe A., Nimon P., Asaana J., Rudant J. P., Kokou K., 2020. Coastline Change Modelling Induced by Climate Change Using Geospatial Techniques in Togo (West Africa). *Advances in Remote Sensing*, 9 (2): 85-100. <https://doi.org/10.4236/ars.2020.92005>
- Labib S. M., Harris A., 2018. The potentials of Sentinel-2 and Landsat-8 data in green infrastructure extraction, using object based image analysis (OBIA) method. *European Journal of Remote Sensing*, 51 (1): 231-240. <https://doi.org/10.1080/22797254.2017.1419441>
- Lasaponara R., 2006. Estimating spectral separability of satellite derived parameters for burned areas mapping in the Calabria region by using SPOT-vegetation data. *Ecological Modelling*, 196 (1-2): 265-270. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.02.025>
- Lewis S. L., Edwards D. P., Galbraith D., 2015. Increasing human dominance of tropical forests. *Science*, 349 (6250): 827-832. <https://doi.org/10.1126/science.aaa9932>
- Mallinis G., Mitsopoulos I., Chrysafi I., 2018. Evaluating and comparing Sentinel 2A and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) spectral indices for estimating fire severity in a Mediterranean pine ecosystem of Greece. *GIScience and Remote Sensing*, 55 (1): 1-18. <https://doi.org/10.1080/15481603.2017.1354803>
- McFeeters S. K., 1996. The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features. *International Journal of Remote Sensing*, 17 (7): 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Miller J. D., Knapp E. E., Key C. H., Skinner C. N., Isbell C. J., Creasy R. M., *et al.*, 2009. Calibration and validation of the relative differenced Normalized Burn Ratio (RdNBR) to three measures of fire severity in the Sierra Nevada and Klamath Mountains, California, USA. *Remote Sensing of Environment*, 113 (3): 645-656. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.11.009>
- Mpakairi K. S., Ndaimani H., Kavhu B., 2020. Exploring the utility of Sentinel-2 MSI derived spectral indices in mapping burned areas in different land-cover types. *Scientific African*, 10: e00565. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00565>
- Nimon P., Issaou L., Konko Y., Kokou K., 2020. Spatio-Temporal Patterns of Rainfall Variability for Wet Season over Togo in West Africa. *Open Access Library Journal*, 7 (1): e6044. <https://doi.org/10.4236/oalib.1106044>
- Reid C. E., Brauer M., Johnston F. H., Jerrett M., Balmes J. R., Elliott C. T., 2016. Critical review of health impacts of wildfire smoke exposure. *Environmental Health Perspectives*, 124 (9): 1334-1343. <https://doi.org/10.1289/ehp.1409277>
- Rwanga S. S., Ndambuki J. M., 2017. Accuracy assessment of land use/land cover classification using remote sensing and GIS. *International Journal of Geosciences*, 8 (4): 611-622. <https://doi.org/10.4236/ijg.2017.84033>

Smith A. M. S., Drake N. A., Wooster M. J., Hudak A. T., Holden Z. A., Gibbons C. J., 2007. Production of Landsat ETM+ reference imagery of burned areas within Southern African savannahs: Comparison of methods and application to MODIS. *International Journal of Remote Sensing*, 28 (12): 2753-2775. <https://doi.org/10.1080/01431160600954704>

Schroeder Th., Behnert I., Schaale M., Fischer J., Doerffer R., 2007. Atmospheric correction algorithm for MERIS above case-2 waters. *International Journal of Remote Sensing*, 28 (7): 1469-1486. <https://doi.org/10.1080/01431160600962574>

Schroeder W., Oliva P., Giglio L., Quayle B., Lorenz E., Morelli F., 2016. Active fire detection using Landsat-8/OLI data. *Remote Sensing of Environment*, 185: 210-220. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.032>

Sow M., Hély C., Mbow C., Sambou B., 2013. Fuel and fire behaviour analysis for early-season prescribed fire planning in Sudanian and Sahelian savannas. *Journal of Arid Environments*, 89: 84-93. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.09.007>

Smith A. M. S., Drake N. A., Wooster M. J., Hudak A. T., Holden Z. A., Gibbons C. J., 2007. Production of Landsat ETM+ reference imagery of burned areas within Southern African savannahs: Comparison of methods and application to MODIS. *International Journal of Remote Sensing*, 28 (12): 2753-2775. <https://doi.org/10.1080/01431160600954704>

Stehman S. V., Foody G. M., 2019. Key issues in rigorous accuracy assessment of land cover products. *Remote Sensing of Environment*, 231: 111199. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.05.018>

Story M., Congalton R. G., 1986. Accuracy assessment: a user's perspective. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52 (3): 397-399. https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1986journal/mar/1986_mar_397-399.pdf

Stroppiana D., Boschetti M., Zaffaroni P., Brivio P., 2009. Analysis and interpretation of spectral indices for soft multicriteria burned-area mapping in Mediterranean regions. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 6 (3): 499-503. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2009.2020067>

Tucker C. J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8: 127-150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)

Veraverbeke S., Verstraeten W. W., Lhermitte S., Goossens R., 2010a. Evaluating Landsat Thematic Mapper spectral indices for estimating burn severity of the 2007 Peloponnese wildfires in Greece. *International Journal of Wildland Fire*, 19 (5): 558-569. <https://doi.org/10.1071/WF09069>

Veraverbeke S., Verstraeten W. W., Lhermitte S., Goossens R., 2010b. Illumination effects on the differenced Normalized Burn Ratio's optimality for assessing fire severity. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12 (1): 60-70. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2009.10.004>

Veraverbeke S., Hook S., Hulley G., 2012. An alternative spectral index for rapid fire severity assessments. *Remote Sensing of Environment*, 123: 72-80. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.025>

Verhegghen A., Eva H., Ceccherini G., Achard F., Gond V., Gourlet-Fleury S., *et al.*, 2016. The potential of Sentinel satellites for burnt area mapping and monitoring in the Congo Basin forests. *Remote Sensing*, 8 (12): 986. <https://doi.org/10.3390/rs8120986>

Wang X., Liu Y., Ling F., Liu Y., Fang F., 2017. Spatio-Temporal Change Detection of Ningbo Shoreline Using Landsat Time-Series Images during 1976-2015. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6 (3): 68. <https://doi.org/10.3390/ijgi6030068>

Yue C., Ciais P., Cadule P., Thonicke K., van Leeuwen T. T., 2015. Modelling the role of fires in the terrestrial carbon balance by incorporating SPITFIRE into the global vegetation model ORCHIDEE. Part 2: Carbon emissions and the role of fires in the global carbon balance. *Geoscientific Model Development*, 8 (5): 1285-1297. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1321-2015>

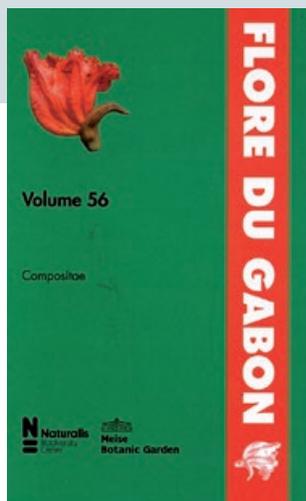
Konko *et al.* – Contribution des auteurs

Rôle du contributeur	Noms des auteurs
Conceptualisation	Y. Konko, K. Kokou
Gestion des données	Y. Konko
Analyse formelle	Y. Konko
Enquête et investigation	Y. Konko, B. Afelu, K. Kokou
Méthodologie	Y. Konko, K. Kokou
Gestion de projet	Y. Konko, K. Kokou
Ressources	Y. Konko, K. Kokou
Logiciels	Y. Konko
Supervision	Y. Konko, K. Kokou
Validation	Y. Konko, B. Afelu, K. Kokou
Visualisation	Y. Konko
Écriture – Préparation de l'ébauche originale	Y. Konko
Écriture – Révision et édition	Y. Konko, B. Afelu, K. Kokou

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

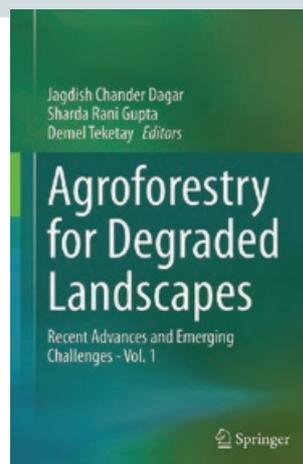


SOSEF M. S. M., FLORENCE J., BOUROBOU BOUROBOU H. P., BISSIENGOU P. (ÉDS SC.), 2021. **FLORE DU GABON. 56. COMPOSITAE.** GERMANY, MARGRAF PUBLISHERS, 148 P.

The *Flore du Gabon* series provides access to the information on the great botanical wealth of this central African country, reputedly harbouring the richest lowland rain forest in Africa. With 12.5% of all plant species being endemic to the country and some 85% of its surface being covered with a highly diverse lowland rain forest, Gabon is a botanical paradise and hotspot. Over 10% of its surface is under protection, which renders this country a Mecca for conservationists, ecotourism and scientists. For an effective conservation management, but also to support a wise and sustainable use of this unique diversity, it is essential to be able to simply identify the plants that play such an important role, be it as food for gorillas, birds, etc., as medicine, nutrition or timber, or just as one of these essential elements of the ecological network. The *Flore du Gabon* provides this essential tool for reliable identification, its editorial team making sure the identification keys are simple and straightforward, descriptions having diagnostic features stand out in bold, and clarifying illustrations. As such, it hopes to assist researchers, foresters, conservationists, amateur botanists and policy makers alike and to contribute to the survival of Gabon's unique biodiversity.

Adapted from the publisher's summary.

Margraf Publishers GmbH, Kanalstrasse 21,
97990 Weikersheim, Germany.
www.margraf-publishers.eu



DAGAR J. C., GUPTA S. R., TEKETAY D. (EDS), 2020. **AGROFORESTRY FOR DEGRADED LANDSCAPES: RECENT ADVANCES AND EMERGING CHALLENGES - VOL. 1.** GERMANY, SPRINGER, 554 P.

This book presents various aspects of agroforestry research and development, as well as the latest trends in degraded landscape management. Over the last four decades, agroforestry research (particularly on degraded landscapes) has evolved into an essential problem-solving science, e.g. in terms of sustaining agricultural productivity, improving soil health and biodiversity, enhancing ecosystem services, supporting carbon sequestration and mitigating climate change. This book examines temperate and tropical agroforestry systems around the world, focusing on traditional and modern practices and technologies used to rehabilitate degraded lands. It covers the latest research advances, trends and challenges in the utilization and reclamation of degraded lands, e.g. urban and peri-urban agroforestry, reclamation of degraded landscapes, tree-based multi-enterprise agriculture, domestication of high-value halophytes, afforestation of coastal areas, preserving mangroves and much more. Given its scope, the book offers a valuable asset for a broad range of stakeholders including farmers, scientists, researchers, educators, students, development/extension agents, environmentalists, policy/decision makers, and government and non-government organizations.

Adapted from the publisher's summary.

Springer-Verlag GmbH, Tiergartenstrasse 17,
69121 Heidelberg, Germany.
www.springer.com

Cartographie des déterminants de l'invasion par le pin maritime, *Pinus pinaster* Ait., de la subéraie de Haddada dans le nord-est de l'Algérie

Aziz MELIANI¹
Mohamed GANA¹
Mohamed El Habib BENDERRADJI¹
Kaouther BEN YAHIA^{2,3}
Djamel ALATOU¹

¹ Université des Frères Mentouri -
Constantine 1
Faculté des sciences de la nature
et de la vie
Département de biologie
et écologie végétale
Laboratoire de développement
et valorisation des ressources
phytogénétiques
BP 325, route de Ain El Bey
25017 Constantine
Algérie

² Université de Carthage
Avenue de la République
BP 77, 1054 Amilcar
Tunisie

³ Institut national de recherches
en génie rural, eaux et forêts
Laboratoire d'écologie forestière
Rue Hédi EL Karray El Menzah IV
BP 10, Ariana 2080
Tunisie

**Auteur correspondant /
Corresponding author:**
Aziz MELIANI – meliaz@yahoo.fr



Photo 1.
La subéraie de Haddada sujette à une invasion par le pin maritime.
The Haddada suberaie subject to invasion by maritime pine.
Photo A. Meliani.

Doi : 10.19182/bft2021.347.a31883 – Droit d'auteur © 2021, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 16 juin 2020 ;
date d'acceptation : 16 décembre 2020 ; date de publication : 25 février 2021.



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

Citer l'article / To cite the article

Meliani A., Gana M., Benderradji M. E. H., Ben Yahia K., Alatou D., 2021. Cartographie des déterminants de l'invasion par le pin maritime, *Pinus pinaster* Ait., de la subéraie de Haddada dans le nord-est de l'Algérie. Bois et Forêts des Tropiques, 347 : 77-88. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2021.347.a31883>

RÉSUMÉ

Cartographie des déterminants de l'invasion par le pin maritime, *Pinus pinaster* Ait., de la subéraie de Haddada dans le nord-est de l'Algérie

Plusieurs subéraies du Nord-Est algérien sont sujettes à une invasion par le pin maritime. Cette dynamique forestière qui a débuté dans les années 1980 est souvent citée parmi les facteurs de dégradation des subéraies algériennes mais n'a encore jamais fait l'objet de recherche. L'objectif de notre étude, qui porte sur le cas de la subéraie de Haddada (wilaya d'El-Tarf), était d'identifier les déterminants de l'invasion par le pin maritime, *Pinus pinaster* Ait., en recourant à une cartographie chorologique de facteurs tels que la pente, l'exposition et les surfaces incendiées en 1994, ainsi qu'une cartographie de la subéraie avant et après l'invasion. L'élaboration des cartes a suivi une approche géomatique complétée par des enquêtes sur le terrain. La cartographie montre que les parties envahies par le pin maritime sont celles qui ont été le plus touchées par l'incendie de 1994, ce qui correspond aussi aux pentes fortes et très fortes. La faible résilience du chêne-liège (*Quercus suber*) dans ces conditions a permis au pin maritime de le supplanter. Cette dynamique illustre bien le paradigme *patch dynamics* dans une forêt méditerranéenne, et nous renseigne aussi sur le potentiel invasif du pin maritime, s'agissant d'une espèce se révélant également invasive ailleurs dans le monde. Le changement climatique risque d'accentuer ces processus d'invasion.

Mots-clés : déterminants, dynamique végétale, invasion, géomatique, *Pinus pinaster* Ait., pin maritime, *Quercus suber*, chêne-liège, subéraie, Algérie.

ABSTRACT

Mapping the determinants of invasion by maritime pine, *Pinus pinaster* Ait., in the Haddada cork oak woods in north-eastern Algeria

A number of cork oak woods in north-eastern Algeria are being invaded by maritime pines. These forest dynamics began in the 1980s and although they are often cited as one of the factors of degradation of Algeria's cork oak woods, they have never been researched. The aim of our study, on the cork oak woods of Haddada (wilaya of El-Tarf) was to identify the determinants of invasion by the maritime pine, *Pinus pinaster* Ait., by chorological mapping of factors such as slopes, exposure and areas burned by wildfires in 1994, together with mapping of the cork oak woods before and after the invasion. The maps were produced by applying a geomatics approach supplemented by ground surveys. The maps show that the areas invaded by maritime pine are those that were most affected by the fires of 1994, which are also those on steep and very steep slopes. The low resilience of cork oaks, *Quercus suber*, in such conditions has allowed maritime pines to supplant them. These dynamics are a good illustration of the "patch dynamics" paradigm in Mediterranean forests and also show the invasive potential of maritime pine, which has been shown to be equally invasive elsewhere in the world. The invasion process is likely to be accentuated by climate change.

Keywords: determinants, plant dynamics, invasion, geomatics, *Pinus pinaster* Ait., maritime pine, *Quercus suber*, cork oak, cork oak wood, Algeria.

RESUMEN

Cartografía de los factores determinantes de la invasión del pino marítimo, *Pinus pinaster* Ait., en el alcornoque de Haddada, en el nordeste de Argelia

Varios alcornocales del nordeste de Argelia sufren la invasión del pino marítimo. Esta dinámica forestal iniciada en los años 1980 se cita a menudo entre los factores de degradación de los alcornocales argelinos, pero nunca ha sido objeto de investigación. El objetivo de nuestro estudio, centrado en el caso del alcornoque de Haddada (valiato de El-Tarf), era identificar los factores determinantes de la invasión del pino marítimo, *Pinus pinaster* Ait. Se utilizó una cartografía corológica teniendo en cuenta factores como la pendiente, la exposición y las superficies quemadas en 1994, así como la cartografía del alcornoque antes y después de la invasión. Los mapas se elaboraron mediante un enfoque geomático complementado con investigaciones realizadas sobre el terreno. La cartografía muestra que las zonas invadidas por el pino marítimo fueron las más afectadas por el incendio de 1994, y también corresponden a las pendientes empinadas y muy empinadas. La escasa resiliencia del alcornoque, *Quercus suber*, a estas condiciones permitió que el pino marítimo lo suplantara. Esta dinámica ilustra claramente el paradigma de la dinámica de parches (*patch dynamics*) en un bosque mediterráneo, y también nos informa sobre el potencial invasor del pino marítimo, ya que esta especie también es invasora en otros lugares del mundo. Es posible que el cambio climático acentúe estos procesos de invasión.

Palabras clave: factores determinantes, dinámica vegetal, invasión, geomática, *Pinus pinaster* Ait., pino marítimo, *Quercus suber*, alcornoque, alcornoque, Argelia.

Introduction

Les dynamiques forestières impliquant des espèces invasives figurent parmi les problématiques fondamentales liées au contexte actuel de changement climatique et d'érosion de la biodiversité. L'étude d'une espèce invasive dans un lieu donné permet une meilleure évaluation de son potentiel invasif dans d'autres lieux (Tassin *et al.*, 2007). Les essences ligneuses invasives sont celles qui causent le plus de dommages au fonctionnement des écosystèmes (Bingeli, 1996 ; Cronk et Fuller, 1998 ; Rejmánek *et al.*, 2005), parmi lesquelles les exotiques inquiètent souvent davantage que les autochtones. Cependant, ces dernières aussi sont indicatrices de changements en cours et nécessitent tout autant d'attention. Notre étude porte sur l'enrésinement naturel où les feuillus sont envahis par les résineux, souvent cité parmi les principaux agents responsables de la dégradation des subéraies algériennes (Ouelmouhoub, 2005 ; Raachi, 2007 ; Aouadi *et al.*, 2010 ; Letreuch-Belarouci *et al.*, 2010 ; Dehane *et al.*, 2011 ; Amoura, 2017).

Notre site d'étude concerne l'invasion de la subéraie de Haddada, dans l'extrême Nord-Est algérien, par le pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.). Dans l'ensemble du bassin versant du lac Tonga, dont fait partie ce site d'étude, l'enrésinement de la subéraie aurait atteint son apogée durant la période de sécheresse qui a débuté dans les années 1980 et s'est achevée au milieu de la décennie suivante (Raachi, 2007). D'après les services forestiers de la région, il aurait débuté dans la subéraie de Haddada il y a plus de 30 ans et se serait accentué après l'incendie de l'été 1994.

Selon Quézel *et al.* (1990), il est rare que les enrésinements naturels soient évalués correctement quel qu'en soit l'élément déclencheur. L'invasion par le pin maritime des subéraies du Nord-Est algérien n'a encore jamais fait l'objet d'études. Ainsi, afin de mieux comprendre la dynamique et les modalités de cette invasion dans la subéraie de Haddada, notre objectif était d'en identifier les déterminants en recourant à une cartographie chorologique de facteurs d'invasion présumés déterminants (pente, exposition et surfaces incendiées en 1994), ainsi qu'à une cartographie de la subéraie avant et après invasion par le pin maritime. L'élaboration des cartes a été assurée par une approche géomatique complétée par des enquêtes sur le terrain.

Présentation du site d'étude

La subéraie de Haddada se situe dans l'extrême Nord-Est algérien, dans la commune de Souarekh, wilaya d'El-Tarf (figure 1) (photos 1 et 2). Elle fait partie du Parc national d'El Kala, classé comme tel depuis juillet 1983, puis classé réserve de la biosphère par l'UNESCO en 1990.

Notre étude concerne la partie sujette à l'invasion par le pin maritime, ce qui représente une superficie de 224,9 ha. Cette écosection se situe sur un versant à dominance ouest d'une basse montagne tellienne, dont la ligne de crête, qui culmine à 594 m (Kef Edmen), correspond à la frontière algéro-tunisienne. Elle représente la limite nord-orientale de la chaîne numidique, dont l'ossature est à base d'argiles et de grès numidien. Le sol, peu profond, est de type brun forestier. Le site compte beaucoup d'affleurements rocheux et le relief accidenté présente beaucoup de pentes de 25 % et plus. Le site fait partie du bassin versant du lac Tonga et est parcouru par plusieurs ravines.

La subéraie de Haddada est sous l'influence d'un climat méditerranéen subhumide, à hiver doux à chaud (Emberger, 1955 ; Raachi, 2007), caractérisé par une pluviométrie qui varie entre 710 et 910 mm/an. La période pluvieuse s'étend d'octobre à avril. La température moyenne annuelle avoisine les 18 °C.

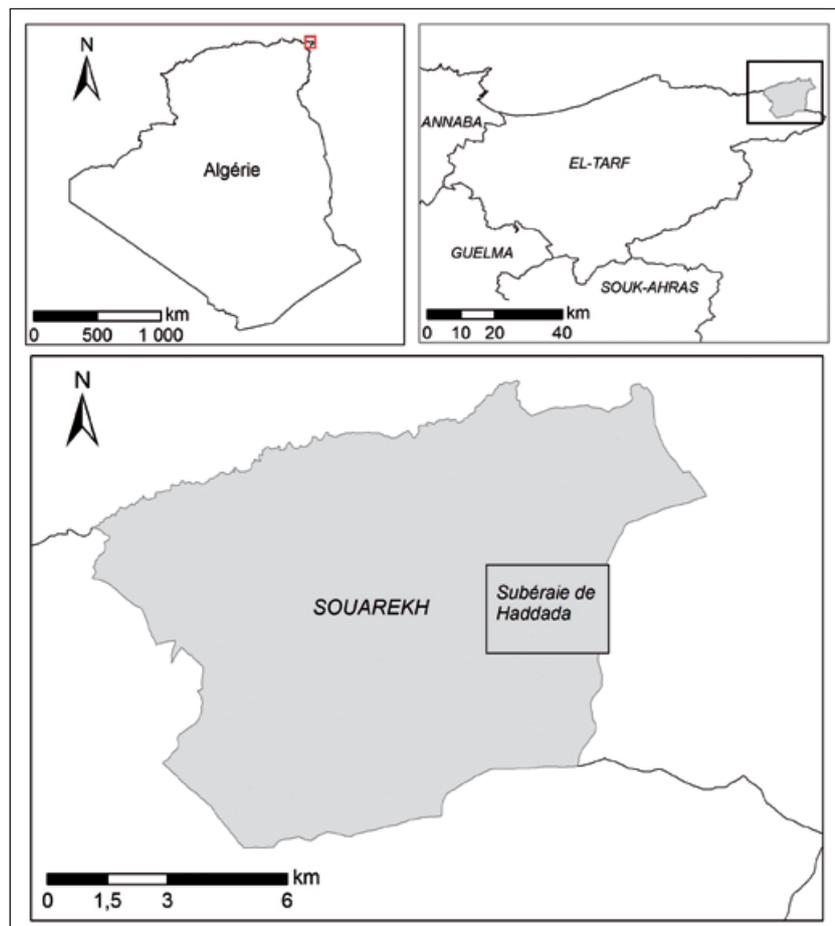


Figure 1.
Situation géographique de la subéraie de Haddada.
Geographical location of the Haddada suberaie.

**Photo 2.**

La subéraie de Haddada sujette à une invasion par le pin maritime.
The Haddada suberaie subject to invasion by maritime pine.
Photo A. Meliani.

Le cortège floristique de la subéraie de Haddada est principalement constitué de *Erica arborea*, *Arbutus unedo*, *Pistacia lentiscus* et *Cytisus triflorus*. Elle est sujette à un envahissement par le pin maritime dont les sujets les plus âgés ne dépassent pas 35 ans, d'après leur dendrométrie. La végétation des ravines est à base de *Salix pedicellata*.

Méthodologie

Nous avons opté pour une approche géomatique, complétée par des enquêtes sur le terrain, pour élaborer des cartes de la subéraie de Haddada avant et après l'invasion par le pin maritime, ainsi qu'une cartographie des déterminants de cette invasion : pente, expositions, et surfaces incendiées en 1994. Ces dernières ont été identifiées par le *Normalized burn ratio* (NBR).

Sources des données

Nous avons utilisé les images satellitaires Landsat et les images Google Earth (tableau I), dont l'association nous a permis d'établir des cartes plus précises.

Landsat nous donne accès à une archive remontant aux années 1980, période où l'envahissement de la subéraie de Haddada par le pin maritime a débuté. Ses images, obtenues gratuitement sur le site Earth Explorer USGS (United States Geological Survey¹), sont de niveau 2A ; elles ont subi une correction géométrique et atmosphérique.

Les images Google Earth nous ont permis d'améliorer la qualité de la classification à partir des échantillons de validation obtenus par photo-interprétation.

Méthodes de traitement des données

Définition des classes thématiques

Notre site d'étude se subdivise en cinq classes thématiques :

- la subéraie – arborée dense, arborée claire, fruticée ;
- les surfaces envahies par le pin maritime (enrésinées) ;
- les terres nues – affleurements rocheux, pistes et routes ;

¹ <http://earthexplorer.usgs.gov/>

Tableau I.
Sources des données utilisées.

Type	Données	Date	Résolution spatiale (m) / échelle	Source
Images satellitaires	Landsat 5 - TM	18 juillet 1984	30	<i>Earth explorer</i> USGS (<i>United States Geological Survey</i> : http://earthexplorer.usgs.gov/)
		18 juillet 1987		
		31 août 1994		
		10 août 2004		
	Landsat 8 - OLI	14 août 2018	30	
Données auxiliaires	Cartes topographiques	2005	1 / 25 000	Institut national de cartographie et de télédétection (INCT)
	<i>Google Earth</i>	2018	0,5	<i>Google Inc.</i>
	Historique du site	/	/	Services forestiers (algériens et tunisiens)
	Données de terrain	/	/	Site d'étude
	Modèle numérique de terrain (MNT)	/	30 m	<i>Global Digital Elevation Model</i> du satellite ASTER

- les surfaces vouées à l'agriculture – terres cultivées, jachères, arboriculture ;
- le bâti.

Des échantillons représentatifs de chaque classe thématique ont été identifiés lors des enquêtes sur terrain, ce qui nous a permis d'être plus précis, sachant que la résolution spatiale des images satellitaires utilisées ne permettait pas à elle seule une bonne discrimination entre feuillus et résineux.

Classification des images

Pour l'élaboration de la carte de la subéraie de Haddada en 1987, nous avons d'abord utilisé deux indices, l'*Optimum index factor*, qui permet la sélection des meilleures bandes spectrales ayant une faible corrélation et une forte variance, afin d'éviter la redondance, et l'indice de séparabilité pour calculer la distance spectrale entre les différentes parcelles d'entraînement. Pour la sélection de ces dernières, nous nous sommes basés sur les données fournies par les services forestiers, d'une part, et la confirmation de ces données par la dendrométrie du chêne-liège, d'autre part, recueillies sur la base d'enquêtes sur le terrain, ce qui indique avec précision les surfaces homogènes occupées par le chêne-liège en 1987. Puis nous avons effectué la classification supervisée à l'aide de l'algorithme *maximum likelihood* (maximum de vraisemblance), qui affecte chaque pixel à la classe ayant obtenu la plus forte probabilité de le contenir (Tso et Mather, 2009). Pour la validation de cette classification, nous avons généré des points aléatoires pour chaque classe d'occupation du sol, qui ont été confirmés par les enquêtes sur le terrain. Deux indices issus de la matrice de confusion sont souvent utilisés pour la validation de la performance des classifications : la précision globale (proportion des pixels bien classés calculée en pourcentage) et l'indice de Kappa (rapport entre le nombre de pixels bien classés et le total des pixels sondés).

Concernant l'élaboration de la carte de la subéraie de Haddada en 2018, nous avons d'abord isolé les routes, les pistes, les roches et le bâti par digitalisation en se basant sur l'interprétation visuelle des images Google Earth, puis nous avons effectué des relevés GPS lors des enquêtes sur le terrain pour délimiter les bouquets de pins maritimes. Le fichier vecteur a ensuite été projeté sur les images afin de compléter la classification. Cette méthode nous a permis de dépasser la difficulté de la discrimination entre pin maritime et chêne-liège, d'une part, et de profiter de la haute résolution spatiale des images Google Earth (0,5 m), d'autre part.

Détection du changement

Nous avons opté pour la méthode de post-classification. Les classifications sont ainsi indépendantes, réduisant par la suite les problèmes de calibration atmosphérique et de capteur inter-dates. Les résultats de la classification pour deux dates produisent des cartes qui consignent toutes les possibilités de changements (Weismiller *et al.*, 1977). Cette méthode confère plus de fiabilité à l'identification des zones de changement.

Traitement du modèle numérique de terrain (MNT)

Nous avons effectué un traitement automatique du MNT, par le système d'information géographique (SIG), pour obtenir une base de données géospatiales comportant toutes les caractéristiques physiques du site. Nous avons effectué la projection cartographique du MNT vers WGS 84 UTM 32 N, ce qui nous a permis de générer les cartes des classes de pente et d'exposition.

Application des indices

Les indices font partie de méthodes de traitement que l'on appelle les transformations multi-spectrales. Ils consistent à convertir la luminance mesurée au niveau des capteurs en valeurs numériques ayant une signification dans les domaines environnementaux.

Nous avons utilisé le NBR (*Normalized Burn Ratio*) pour la chorologie de l'invasion par le pin maritime vis-à-vis des surfaces brûlées en août 1994. Il est déterminé à partir de l'écart de réflectance entre les canaux du proche infrarouge (PIR) et les ondes courtes infrarouge (SWIR). Il permet l'identification des surfaces brûlées (Key et Benson, 2006). Il se calcule comme suit :

$$\text{NBR} = (\text{PIR} - \text{SWIR}) / (\text{PIR} + \text{SWIR})$$

Les valeurs élevées (positives) du NBR correspondent à une végétation en bon état, alors que les valeurs basses (négatives) correspondent aux terres nues et aux surfaces récemment incendiées. Les valeurs proches de zéro sont les surfaces non incendiées.

Acquisition des données de terrain

Nous avons effectué plusieurs sorties sur terrain, pour des collectes de données et des observations dans la subéraie de Haddada. Cela a été déterminant pour élaborer des cartes précises par les vérifications directes, afin de corriger et de valider les résultats du traitement des images satellitaires, et l'observation de la structure de la forêt et sa composition.

Résultats

Cartographie de la subéraie de Haddada avant et après l'invasion par le pin maritime

Les figures 2 et 3 représentent respectivement la subéraie de Haddada en 1987 et 2018.

Selon la matrice de confusion de l'image classée (1987), la quasi-totalité des pixels affectés à ces classes ont été bien classés. La précision y dépasse 80 % pour la majorité des classes (tableau II).

La valeur du coefficient de Kappa estimée dans notre cas est de 84,4 %, sachant que la valeur critique inférieure de ce dernier, au-delà de laquelle une classification est jugée acceptable, est de 75 % (Girard et Girard, 1999). On peut donc dire qu'il y a une très bonne correspondance entre la cartographie issue de la classification des données de la télédétection et les observations issues du terrain.

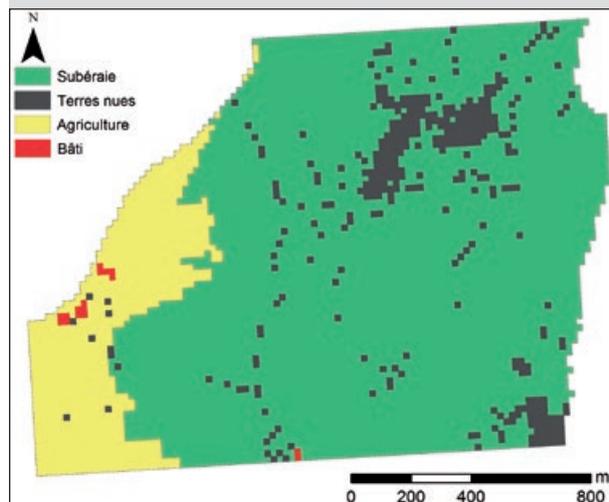


Figure 2.
La subéraie de Haddada en 1987.
Haddada's suberaie in 1987.

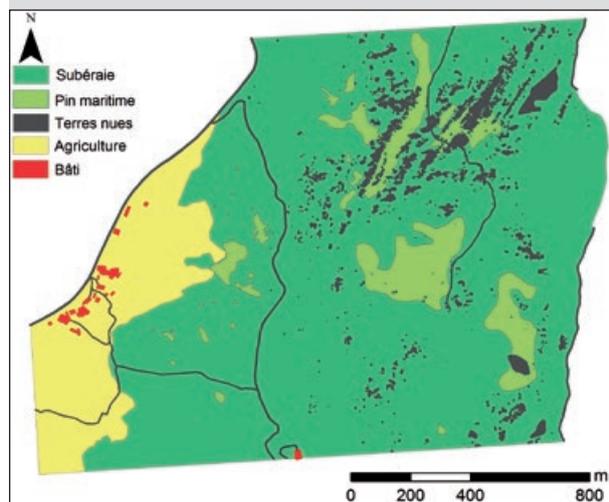


Figure 3.
La subéraie de Haddada en 2018 envahie par le pin maritime.
The Haddada suberaie in 2018 invaded by maritime pine.

Tableau II.
Indices de précision de la classification de l'image Landsat de 1987.

Classes d'occupation du sol	Précision cartographique (%)	Précision thématique (%)
Chêne-liège	92,98	94,46
Roches - Terres nues	81,81	81,81
Agriculture	93,75	78,94
Bâti	84,61	100
Précision globale		89,81
Coefficient de Kappa		84,42

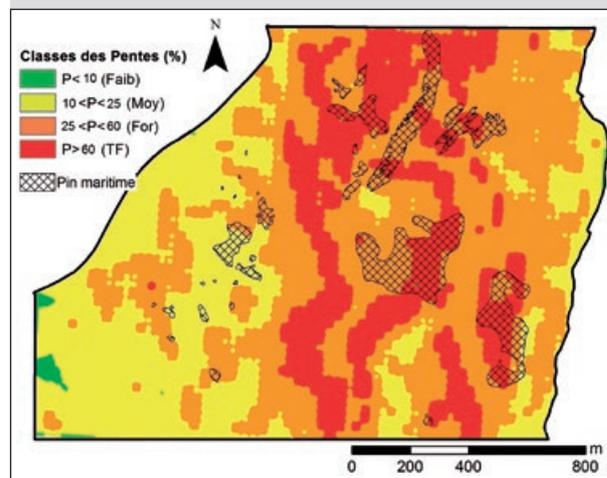


Figure 4.
Classes des pentes et surfaces envahies par le pin maritime.
Classes of slopes and surfaces invaded by maritime pine.

L'invasion de la subéraie de Haddada par le pin maritime se présente sous forme de bouquets arborés (figure 3), dont la superficie varie de quelques mètres carrés à quelques hectares (6 ha). Ils sont répartis sur l'ensemble de la subéraie, majoritairement sur le flanc du versant au-dessus de 250 m d'altitude. La superficie totale envahie par le pin maritime est de 17,96 ha, soit 7,98 % du site et 9,37 % de la surface forestière. Si la majorité des surfaces enrésinées (81,79 %) étaient autrefois occupées par le chêne-liège (*Quercus suber* L.), une partie (18,21 %) était cependant constituée de terres nues.

Le tableau III représente la matrice de transition des classes thématiques (en pourcentage) entre 1987 et 2018.

Cette matrice de transition montre que 8,32 % de la subéraie (soit 14,69 ha) et 21,43 % (soit 3,27 ha) de terres nues ont été envahies par le pin maritime.

Déterminants de l'invasion de la subéraie de Haddada par le pin maritime

Relation entre la pente et l'invasion de la subéraie de Haddada par le pin maritime

La figure 4 représente la superposition des classes de pentes aux surfaces envahies par le pin maritime.

Les surfaces de la subéraie de Haddada envahies par le pin maritime sont à 46,8 % situées sur des pentes fortes, et à 44,9 % sur des pentes très fortes, alors que seules 8,3 % d'entre elles sont situées sur des pentes moyennes (tableau IV). Sur ce terrain accidenté, le sol est peu profond avec des affleurements rocheux.

Relation entre l'exposition et l'invasion de la subéraie de Haddada par le pin maritime

La figure 5 représente la superposition des expositions aux surfaces envahies par le pin maritime.

Les surfaces de la subéraie de Haddada envahies par le pin maritime représentent 46,6 % de la superficie et sont exposées à l'ouest, 31,5 % étant exposées au nord-ouest et 11,8 % au sud-ouest (tableau V). Les expositions ouest sont donc celles qui contiennent le plus de surfaces enrésinées, mais nous devons rappeler que l'ensemble du site d'étude est lui-même à domination ouest.

Tableau III.
 Matrice de transition des classes thématiques (en pourcentage) entre 1987 et 2018.

Classes d'occupation du sol		2018				
		Subéraie	Pin maritime	Terres nues	Agriculture	Bâti
1987	Subéraie	87,06	8,32	3,88	0,24	0
	Pin maritime	0	0	0	0	0
	Terres nues	39,57	21,43	36,31	1,43	0,07
	Agriculture	10,01	0,02	2,98	84,14	1,21
	Bâti	0	0	1,36	0,43	97,36

Tableau IV.
 Surfaces envahies par le pin maritime en fonction des pentes.

Valeurs de la pente (P)	Classes de pente	Surfaces envahies par le pin maritime (ha)	Surfaces envahies par le pin maritime (%)
P < 10 %	Faible	0	0
10 % < P < 25 %	Moyenne	1,49	8,34
20 % < P < 60 %	Forte	8,35	46,78
P > 60 %	Très forte	8,02	44,89

Relation entre l'incendie et l'invasion de la subéraie de Haddada par le pin maritime

En août 1994 un incendie a touché la subéraie de Haddada, ainsi que le versant est, du côté tunisien. La figure 6 représente le NBR de la fin août 1994, avec les surfaces envahies par le pin maritime en 2018.

La partie de la subéraie située au-dessus de 250 m relève majoritairement d'un NBR négatif, indiquant alors les surfaces incendiées en août 1994. C'est sur cette partie que se situent la plupart des surfaces envahies par le pin maritime (figure 6).

Tableau V.
 Surfaces envahies par le pin maritime en fonction des expositions.

Exposition	Surfaces envahies par le pin maritime (ha)	Surfaces envahies par le pin maritime (%)
Sud-est	0,08	0,42
Sud	1,39	7,79
Sud-ouest	2,10	11,77
Ouest	8,32	46,56
Nord-ouest	5,62	31,49
Nord	0,35	1,97

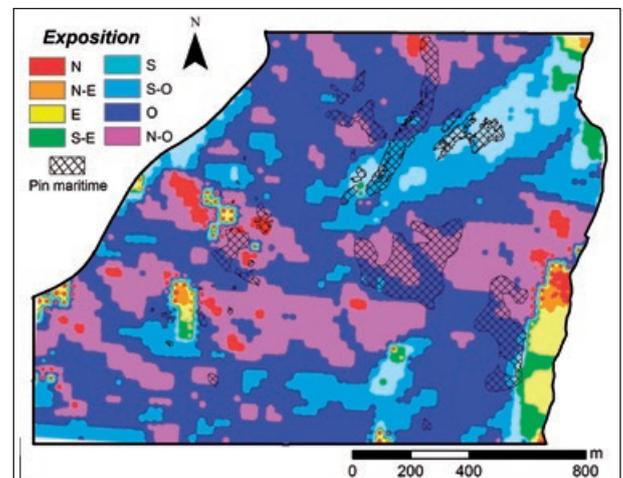


Figure 5.
 Expositions et surfaces envahies par le pin maritime.
 Exposures and areas invaded by maritime pine.

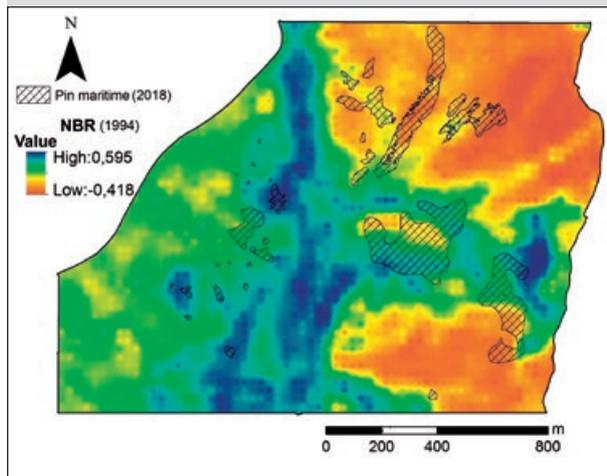


Figure 6.
NBR (Normalized Burn Ratio) et surfaces envahies par le pin maritime.
NBR (Normalized Burn Ratio) and surfaces invaded by maritime pine.

Discussion

Dynamique de l'invasion de la subéraie de Haddada par le pin maritime

Le pin maritime est une espèce à stratégie (r) (Barbero, 1995), classée parmi les conifères colonisateurs opportunistes selon le modèle expansionniste de Barbero et Quézel (1989), pionnière pour la subéraie, se situant parmi les arbres « occupants de places vides » qui s'installent après perturbation (Blondel, 1995). Ainsi, du point de vue des successions végétales, l'invasion d'une subéraie par le pin maritime correspond à une dynamique régressive. Dans notre site, elle a touché 9,37 % de la surface forestière. Avec une population de pin maritime non équiennée, et des semenciers âgés de moins de 35 ans, il lui aura fallu une vingtaine d'années pour coloniser cette superficie de la subéraie de Haddada. La répartition du pin maritime par bouquets indique une colonisation par dispersion d'abord, puis une colonisation frontale et/ou par nucléation, dans des micro-habitats favorables à son installation. Trois hypothèses peuvent être proposées concernant son origine, précisées ci-après.

Ses graines, à l'état de dormance, faisaient partie du potentiel séminal local (édaphique), c'est-à-dire de la crypto-banque de graines. La levée de dormance succède souvent à une perturbation qui augmente subitement la lumière au niveau du sol (Rameau, 1999). L'invasion par le pin maritime résulterait alors d'un *storage effect* (effet de stockage). Mais ce qui rend cette hypothèse peu plausible est la faible longévité des graines de pin maritime, puisque, d'après Calama *et al.* (2017), la persistance des graines dans le sol chez la majorité des pins méditerranéens est très faible. Ces graines deviendraient non viables au-delà de deux ans d'après Martínez-Sánchez *et al.* (1995) et auraient donc un rôle mineur dans les processus de régénération.

Une deuxième hypothèse est que les graines constituant le potentiel séminal advectif (Rameau, 1999) ont été amenées lors et/ou après une perturbation par différents vecteurs de propagation, s'agissant du vent ou d'animaux ou, parfois, par l'effet même du feu sur les cônes sérotineux du pin maritime puisque, d'après Reyes et Casal (2001), dans la moitié des cas, les écailles des cônes s'ouvrent sous l'effet d'un choc thermique. Cette hypothèse est plus plausible sachant que le pin maritime faisait partie du stock dendrologique régional, puisque déjà présent sur le versant est du massif, situé du côté tunisien. Elle est confortée par le rôle primordial que joue la pluie de graines chez le pin maritime, seul approvisionnement de graines viables selon Guignabert (2018).

Enfin, selon une troisième hypothèse, des recrûs de pin maritime étaient déjà installés sous le chêne-liège, tolérant l'ombrage. Suite à une perturbation, leur croissance aurait repris normalement et ces individus auraient alors composé le potentiel végétatif (ou recrû végétatif) du peuplement (Rameau, 1999). La limite de cette hypothèse réside toutefois dans le tempérament héliophile du pin maritime.

Déterminants de l'invasion de la subéraie de Haddada par le pin maritime

Relation entre la pente et l'invasion de la subéraie de Haddada par le pin maritime

La majorité des surfaces envahies par le pin maritime sont situées sur des pentes fortes (de 20 % à 60 %) à très fortes (> 60 %), en raison de conditions plus à même de favoriser l'invasion suite à une perturbation (incendie). On y observe un sol pauvre et peu profond avec des affleurements rocheux, à cause de l'érosion hydrique, elle-même accentuée en l'absence de végétation après incendie. L'humidité de la station est également tributaire de la pente en raison de son rôle dans les modalités d'infiltration et de rétention de l'eau par le sol (Chouahda, 2016). Ainsi, sur les pentes fortes où le sol est peu profond, la rétention de l'eau est faible, ce qui réduit l'humidité de la station et le bilan hydrique du sol. Enfin, l'eau des précipitations ruisselle en surface ou migre obliquement à travers les horizons supérieurs puis s'accumule au bas des pentes (Lacoste et Salanon, 1999).

Ces pentes élevées compromettent en outre la résilience de la subéraie. La hauteur, la surface terrière et le diamètre du chêne-liège diminuent en effet avec l'augmentation de la pente (Chouahda, 2016), les pieds présents sur ces pentes devenant alors plus vulnérables aux incendies et moins résilients. Le chêne-liège survit mieux au feu avec des paramètres dendrométriques élevés, comme cela est le cas pour la plupart des essences soumises aux incendies (Dubois, 1990 ; Rigolot, 2004), exception faite pour les vieux arbres à diamètre particulièrement élevé (Catry *et al.*, 2012), à cause de la diminution de leur capacité à produire des rejets (Johnson *et al.*, 2009).

Relation entre l'exposition et l'invasion de la subéraie de Haddada par le pin maritime

L'exposition nord est réputée plus favorable pour la croissance du chêne-liège, puisque relativement moins stressante au plan thermique et relevant de précipitations plus abondantes (Chouahda, 2016 ; Boussaidi et Mechregui, 2017). La subéraie y serait donc plus résiliente et moins susceptible d'être supplantée par le pin maritime. Cependant, notre site d'étude se trouve sur le versant ouest d'un massif orienté selon un axe nord-sud. Les expositions ouest, nord-ouest et sud-ouest totalisent plus de 80 % du site, où sont réparties 89,8 % des surfaces enrésinées. La domination ouest ne nous permet pas de conclure quoi que ce soit quant au lien entre l'invasion d'une subéraie par le pin maritime et le facteur exposition. Cela nécessiterait une comparaison avec d'autres subérais sujettes à l'invasion par le pin maritime.

Néanmoins, on peut évoquer certaines conditions stationnelles liées à cette exposition et qui pourraient intervenir directement ou indirectement dans cette dynamique. Le nord de l'Algérie est caractérisé par la prépondérance des vents ouest et nord-ouest, qui accompagnent la plupart des perturbations météorologiques touchant cette région, ce qui rend ces versants particulièrement exposés aux effets du vent et de la pluie. En été, les vents sont variables, avec la manifestation du sirocco, vent chaud soufflant du sud (Sahara). La partie exposée à l'ouest n'est pas à l'abri des effets de ce vent qui assèche l'atmosphère et favorise, avec les températures élevées, les incendies de forêt (Raachi, 2007). Ainsi, contrairement à l'exposition nord qui présente des conditions microclimatiques meilleures pour la résilience du chêne-liège, l'exposition ouest semble au contraire l'affaiblir, rendant la subéraie plus vulnérable à une éventuelle dynamique régressive, telle celle représentée par l'invasion par le pin maritime.

Relation entre l'incendie et l'invasion de la subéraie de Haddada par le pin maritime

Une dynamique régressive est déclenchée par des perturbations. Selon Sousa (1984), Pickett et White (1985) et Blondel (1995), le régime régional de perturbations spontanées propre à chaque grand système forestier, caractérisé dans le cas des forêts méditerranéennes par la récurrence des incendies, définit le maillage des mosaïques forestières à divers stades de développement. Cette mosaïque des taches relate donc l'histoire des feux et leur fréquence durant une période donnée (Bekdouche, 2010). L'invasion de la subéraie de Haddada par le pin maritime illustre parfaitement ce processus, ainsi que le paradigme *patch dynamics*.

Selon le modèle de la « composition floristique initiale » proposé par Egler (1954), ce sont les espèces présentes avant l'incendie qui réapparaissent après dans une subéraie. Mais cela dépend du délai entre incendies successifs, qui doit être suffisant pour permettre aux espèces de persister dans les communautés (Bekdouche, 2010). Lorsque la fréquence des incendies et leur intensité ne sont pas trop excessives, ils peuvent même être un facteur de diversité floristique (Amandier, 2002). Selon Quézel et Medail (2003), la majorité des formations sclérophylles de Méditerranée sont parcourues en moyenne par un incen-

die tous les 25 ans environ. Tout en étant très combustible, le chêne-liège a une aptitude remarquable à reformer une structure forestière (Jacquet et Prodon, 2007). Ses premiers rejets commencent à apparaître peu de temps après l'incendie (Arianoutsou, 1998). Son temps de retour à l'état initial, estimé par Jacquet et Prodon (2007), est court, soit 6 à 18 ans pour la végétation et 5 à 7 ans pour l'avifaune de la subéraie.

Selon Prodon (1988), en fonction du régime des incendies, le chêne-liège déploie deux stratégies. Lorsque la fréquence est inférieure à deux incendies sur 50 ans, il favorise la régénération du houppier, généralement grâce à des bourgeons épicromiques protégés par son écorce subéreuse ou liège (Amandier, 2002), tout en développant quelques rejets de souche au risque d'un éventuel dépérissement de l'arbre-mère (Prodon, 1988). Mais si la fréquence des incendies est supérieure à trois incendies sur 50 ans, la régénération du houppier est entravée, et le chêne-liège privilégie les rejets de souche (Prodon, 1988). L'incendie d'août 1994 de la subéraie de Haddada n'aurait donc pas suffi, à lui seul, pour déclencher l'envahissement par le pin maritime. La littérature mentionne deux incendies antérieurs, en 1993 et en 1983, ayant touché le bassin versant du lac Tonga, dont fait partie notre zone d'étude (Raachi, 2007). Nous n'avons pas pu vérifier cela par les images satellitaires ou par les informations recueillies auprès des services forestiers. Néanmoins, nous avons observé plusieurs pieds de chêne-liège en cépée, dans la partie basse de la subéraie, cette dernière n'ayant pas été touchée par l'incendie de 1994 (figure 6) et restant très peu enrésinée (figure 3). Ces cépées indiquent probablement des incendies antérieurs à celui de 1994, qui auraient favorisé une régénération du chêne-liège par rejets de souche, tout en déclenchant le début de l'envahissement par le pin maritime dans la partie haute de la subéraie.

L'invasion par le pin maritime pourrait aussi être la conséquence d'une synergie des facteurs du milieu manifestée lors de ces dernières décennies relevant du changement climatique, dont l'augmentation des pluies torrentielles qui favorisent l'érosion et l'appauvrissement du sol, les périodes de sécheresse, ainsi que la fréquence accrue des incendies. L'incendie de 1994 serait dans ce cas un simple accélérateur de cette synergie de processus.

Scénarios prévisionnels

Différents scénarios sont envisageables quant au devenir de la subéraie de Haddada sujette à une invasion par le pin maritime.

- L'enrésinement peut constituer une relance, par une succession secondaire, du cycle sylvigénétique, si aucune perturbation ne l'entrave. La reconquête par le chêne-liège des surfaces enrésinées serait alors possible grâce à un modèle de tolérance, la cime peu compacte du pin maritime n'entravant en rien la réinstallation du chêne-liège au tempérament héliophile.
- Un blocage du cycle sylvigénétique est en revanche envisageable si le potentiel séminal au sein de l'écosystème est absent, étant donné le problème de régénération par semis dont souffrent les subérais du Nord-Est algérien

(Raachi, 2007). On parlera alors d'un métaclimax, avec une mosaïque de taches constituée par la présence, sur un seul massif, de successions végétales asynchrones (Blondel, 1995), où se juxtaposent affleurement rocheux à mousses et lichens, pelouse préforestière, fruticée, phase pionnière forestière à pin maritime, et phase climacique ou subclimacique à chêne-liège, toutes étant également nécessaires au fonctionnement de la forêt à l'échelle du paysage (Blondel, 1995). Selon Rameau (1999), les successions ne suivent pas forcément une progression linéaire dans le temps mais peuvent être caractérisées par des paliers successionnels et des périodes de stabilisation marquées par un fort ralentissement des processus.

▪ Si toutefois les perturbations (incendies et changements climatiques) s'accroissent, cela favorisera la dynamique régressive, où le pin maritime dominera dans un premier temps, laissant place à des stades plus pionniers, voire à l'apparition d'une végétation semi-désertique (Pausas *et al.*, 1999). D'après Bekdouche (2010), les formations forestières dominées par les résineux accusent le coup sévèrement lors d'incendies à répétition et peuvent basculer vers des séries régressives. Or, d'après l'étude de Arfa *et al.* (2019) sur les risques d'incendies dans la wilaya d'El-Tarf, notre zone d'étude présente un risque de feu de forêt élevé à très élevé.

Pour éviter ce dernier scénario, qui est plausible vu la tendance actuelle, l'intégration de la population locale dans les programmes de conservation constitue un impératif. Il s'agit de minimiser les risques d'incendies qui sont volontaires pour la plupart (Arfa *et al.*, 2019), et d'accompagner ainsi la forêt dans sa dynamique naturelle. L'envahissement par le pin maritime pourrait favoriser dans ce cas la résilience de la subéraie par le truchement d'une succession secondaire.

L'invasion par le pin maritime dans le monde

Le genre *Pinus* est cité parmi les genres botaniques utilisés en foresterie présentant des risques d'invasion majeurs, puisqu'il fait partie des essences forestières à croissance rapide qui résistent bien aux perturbations (Tassin *et al.*, 2007). De surcroît, ces essences sont souvent localisées à proximité des milieux naturels (Foxcroft *et al.*, 2006), ce qui représente parfois une cause majeure de l'affaiblissement des espèces indigènes, en tout cas dans les écosystèmes insulaires (Tassin *et al.*, 2009). Parmi les espèces du genre *Pinus*, le pin maritime (*P. pinaster*) est particulièrement préoccupant (Tassin *et al.*, 2009 ; Pyšek *et al.*, 1995). Il est classé parmi les cinq pins les plus invasifs dans le monde (Pyšek *et al.*, 1995). Nos résultats démontrent le lien entre incendie et invasion par le pin maritime (figure 6) ainsi que sa capacité à s'accommoder des conditions du milieu de plus en plus contraignantes dans ce contexte de changement climatique, ce qui confirme son grand potentiel invasif que ce soit dans son aire naturelle ou ailleurs. Bien que le rôle des perturbations en tant que facteurs prédisposants voire déclenchants des invasions soit évident, elles demeurent les grandes absentes des modèles prédictifs (Tassin *et al.*, 2007).

Conclusion

L'invasion de la subéraie de Haddada par le pin maritime (*Pinus pinaster*) s'inscrit à la fois dans une tendance régionale, où plusieurs subéraies du Nord-Est algérien sont sujettes à cette dynamique, et dans une tendance mondiale d'érosion de la biodiversité, exacerbée par le changement climatique. Cela nous renseigne sur les modalités de cette évolution inquiétante qui favorise les quelques espèces qui s'accommodent le mieux aux contraintes actuelles, au détriment de l'ensemble de la biodiversité, ce qui confirme un peu plus la métaphore de *macdonaldisation* du vivant formulée par Lövei (1997).

L'urgence de ce contexte impose des solutions à la fois locales et globales, le perfectionnement des modèles prédictifs, la coopération des scientifiques et des gestionnaires, l'intégration des populations locales dans les programmes de protection des patrimoines forestiers. La subéraie de Haddada est d'autant plus concernée par la mise en place d'un programme de conservation rigoureux et réalisable qu'elle fait partie du Parc national d'El Kala, réserve de la biosphère depuis 1990.

L'augmentation des incendies et la dégradation des conditions du milieu risquent d'accroître l'enrésinement de la subéraie, voire l'installation d'une végétation semi-désertique par une série régressive. Une bonne conservation des subéraies envahies par le pin maritime, celle de Haddada en particulier, pourrait relancer le cycle sylvigénétique permettant la réinstallation du chêne-liège par une succession secondaire.

Remerciements

Pour leur précieuse aide et collaboration, nous remercions les services forestiers de la wilaya d'El-Tarf, plus particulièrement Ahmed Abdiouene (INRF, El Kala), de même que les services forestiers tunisiens et l'Institut national de recherches en génie rural, eaux et forêts (Ariana, Tunisie), mais aussi Azzedine M. T. Arfa et Mohamed Bendjaballah (Université des Frères Mentouri - Constantine 1).

Références

- Amandier L., 2002. La subéraie : biodiversité et paysage. In : Vivexpo 2002 : La Subéraie : biodiversité du paysage, colloque du 30 mai au 2 juin 2002. Vivexpo, Institut méditerranéen du liège, 19-24. <http://www.vivexpo.org/foire/accueil.html#colloques>
- Amoura M., 2017. Écologie et biologie de l'insecte ravageur *Platypus Cyindrus* Fab. (Coleoptera : Paltypodidae) dans le peuplement de chêne-liège du nord-est de l'Algérie. Thèse de doctorat en sciences, Université Badji Mokhtar - Annaba, Algérie, 67 p.

- Aouadi A., Khaznadar M., Aouadi H., 2010. La relance du chêne-liège dans le Plan national de reboisement en Algérie. *Forêt Méditerranéenne*, 31 (1) : 45-54. <http://www.foret-mediterranee.org/fr/catalogue/id-1554-la-relance-du-chene-liege-dans-le-plan-national-de-reboisement-en-algerie>
- Arfa A. M. T., Benderradji M. E. H., Saint-Gérand T., Alatu D., 2019. Cartographie du risque feu de forêt dans le Nord-est algérien : cas de la wilaya d'El Tarf. *Cybergeo, Environnement, Nature, Paysage*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.32304>
- Arianoutsou M., 1998. Aspect of demography in post-fire Mediterranean plant communities of Greece. *Landscape Disturbance and Biodiversity in Mediterranean-Type Ecosystems*, 273-295. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-03543-6_16
- Barbero M., 1995. Évolution des espaces forestiers et de la faune sauvage en Provence Côte d'Azur. Quels modes de gestion ? *Forêt Méditerranéenne*, 16 (3) : 349-360. <http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/40672>
- Barbero M., Quézel P., 1989. Structures, architectures forestières à sclérophylles et prévention des incendies. *Bulletin d'Écologie*, 20 : 7-14.
- Bekdouche F., 2010. Évolution après feu de l'écosystème subéraie de Kabylie (Nord algérien). Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, 175 p. <https://dl.ummo.dz/handle/ummo/1859>
- Binggeli P., 1996. A taxonomic, bio-geographical and ecological overview of invasive woody plants. *Journal of Vegetation Science*, 7 (1): 121-124. <https://www.jstor.org/stable/3236424?seq=1>
- Blondel J., 1995. La dynamique de la forêt naturelle. *Forêt Méditerranéenne*, 16 (3) : 239-246. http://www.foret-mediterranee.org/upload/biblio/FORET_MED_1995_3_239.pdf
- Boussaidi N., Mechregui T., 2017. Effets des facteurs du milieu sur la densité du chêne-liège en Kroumirie (Nord-Ouest de la Tunisie). *Journal of New Sciences, Agriculture and Biotechnology*, 41 (5): 2223-2232. <https://www.jnsiences.org/component/content/article.html?id=321:effects-of-environment-factors-on-the-density-of-cork-oak-forest-in-kroumirie-north-west-of-tunisia>
- Calama R., Manso R., Lucas-Borja M. E., Espelta J. M., Piqué M., Bravo F., *et al.*, 2017. Natural regeneration in Iberian pines: A review of dynamic processes and proposals for management. *Forest Systems*, 26 (2): eR02S. <https://revistas.inia.es/index.php/fs/article/view/11255>
- Catry F. X., Moreira F., Pausas J. G., Fernandes P. M., Rego F., Cardillo E., *et al.*, 2012. Cork oak vulnerability to fire: the role of bark harvesting, tree characteristics and abiotic factors. *PLoS One*, 7 (6): e39810. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0039810>
- Chouahda S., 2016. Résilience des écosystèmes forestiers du nord-est algérien après incendie : Cas des subéraies. Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar - Annaba, Algérie, 115 p. <https://biblio.univ-annaba.dz/wp-content/uploads/2016/09/These-Chouhada-Soumaya.pdf>
- Cronk C. B., Fuller J. L., 1998. Plant invaders. The threat to natural ecosystems. *Biodiversity & Conservation*, 7: 267-269. <https://doi.org/10.1023/A:1017152906274>
- Dehane B., Bouhraoua R. T., Gonzalez Adrados J. R., Belhoucine L., 2011. Caractérisation de la qualité du liège selon l'état sanitaire des arbres par la méthode d'analyse d'image. Cas des forêts de M'Sila et de Zariéffet (Nord-Ouest Algérien). *Forêt Méditerranéenne*, 32 (1) : 39-50. <http://www.foret-mediterranee.org/fr/catalogue/id-1622-caracterisation-de-la-qualite-du-liege-selon-l-etat-sanitaire-des-arbres-par-la-methode-d-analyse-d-image-cas-des-forets-de-m-sila-et-de-zarieffet-nord-ouest-algerien>
- Dubois C., 1990. Comportement du chêne-liège après incendie. Nogent-sur-Vernisson, France, ENITEF, 97 p.
- Egler F. E., 1954. Vegetation science concepts. I. Initial floristic composition, a factor in old-field vegetation development. *Vegetatio*, 4: 412-417. <https://doi.org/10.1007/BF00275587>
- Emberger L., 1955. Une classification biogéographique des climats. *Recueil des Travaux des Laboratoires de Botanique, Géologie et Zoologie de la Faculté des Sciences de l'Université de Montpellier, Série Botanique*, 7, 3-43.
- Foxcroft L. C., Lotter W. D., Runy-Oro V. A., Mattay P. M. C., 2006. A review of the importance of invasive alien plants in the Ngorongoro Conservation Area and Serengeti National Park. *African Journal of Ecology*, 44: 404-406. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2028.2006.00607.x>
- Girard M.-C., Girard C. M., 1999. Traitement des données de télédétection. Paris, France, Dunod, 529 p.
- Guignabert A., 2018. Étude des processus de régénération naturelle du pin maritime en contexte de dune forestière gérée. Influence de la sylviculture, du climat et des interactions biotiques. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, France, 140 p. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-02121792>
- Jacquet K., Prodon R., 2007. Résilience comparée des peuplements de Chêne vert et de Chêne-liège après incendie. *Revue Forestière Française*, 1 : 31-44. <http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/8481>
- Johnson P. S., Shifley S. R., Rogers R., 2009. The ecology and silviculture of oaks. Wallingford, UK, CABI Publishing, 580 p. <https://www.uhu.es/cideu/PreWeb/Boletin/Oaks.pdf>
- Key C. H., Benson N. C., 2006. Landscape assessment: Remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio. *In: Lutes D. C. (ed.). FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System*. Washington, DC, USA, USDA Forest Service. https://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_gtr164.pdf
- Lacoste A., Salanon R., 1999. Éléments de biogéographie et d'écologie. Paris, France, Éditions Nathan, 189 p.
- Letreuch-Belarouci A., Letreuch-Belarouci N., Medjahd B., Benabdeli K., 2010. Étude de la structure des peuplements de chêne-liège dans le massif Hafir-Zariéffet (Nord-ouest de l'Algérie). *In: Integrated Protection in Oak Forests*. IOBC/WPRS Bulletin, 57 : 42-48. https://www.iobc-wprs.org/members/shop_en.cfm?mod=Shop_detail_produkte=54
- Lövei G. L., 1997. Global change through invasions. *Nature*, 388: 627-628. <https://doi.org/10.1038/41665>
- Martínez-Sánchez J. J., Marín A., Herranz J. M., Ferrandis P., De las Heras J., 1995. Effects of high temperatures on germination of *Pinus halepensis* Mill. and *P. pinaster* Aiton subsp. *pinaster* seeds in southeast Spain. *Vegetatio*, 116: 69-72. <https://doi.org/10.1007/BF00045279>

Quelmouhoub S., 2005. Gestion multi-usage et conservation du patrimoine forestier : cas des subéraies du Parc national d'El Kala (Algérie). Thèse de Master of science, Institut agro-nomique méditerranéen, Montpellier, France, 127 p.

Pausas J. G., Carbo E., Caturla R. N., Gil J. M., Vallejo R., 1999. Post-fire regeneration patterns in the eastern Iberian Peninsula. *Acta Oecologica*, 20 (5): 499-508. [https://doi.org/10.1016/S1146-609X\(00\)86617-5](https://doi.org/10.1016/S1146-609X(00)86617-5)

Pickett S. T. A., White P. S. (eds), 1985. *The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics*. San Diego, CA, USA, Academic Press, 472 p. <https://www.sciencedirect.com/book/9780125545204/the-ecology-of-natural-disturbance-and-patch-dynamics>

Pyšek P., Prach K., Rejmánek M., Wade M. (eds), 1995. *Plant invasions: general aspects and special problems*. Amsterdam, The Netherlands, SPB Academic Publ., 263 p.

Prodon R., 1988. Dynamique des systèmes avifaune-végétation après déprise rurale et incendie dans les Pyrénées méditerranéennes siliceuses. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France, 333 p.

Quézel P., Barbero M., Loisel R., 1990. Les reboisements en région méditerranéenne. Incidences biologiques et économiques. *Forêt Méditerranéenne*, 12 (2) : 103-114. <http://www.foret-mediterranee.org/fr/catalogue/id-456-les-reboisements-en-region-mediterraneeenne-incidences-biologiques-et-economiques>

Quézel P., Medail F., 2003. *Écologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen*. Paris, France, Lavoisier, 576 p.

Raachi M. L., 2007. Étude préalable pour une gestion intégrée des ressources du bassin versant du lac Tonga au nord-est algérien. Mémoire de maîtrise en géographie, Université du Québec, Montréal, Canada, 188 p. <https://archipel.uqam.ca/736/>

Rameau J.-C., 1999. Accrus, successions végétales et modèles de dynamique linéaire forestière. *Ingénieries – EAT*, 33-48. <http://www.set-revue.fr/sites/default/files/articles-eat/pdf/1999-PUB00007716.pdf>

Rejmánek M., Richardson D. M., Higgins S. I., Pitcairn M. J., Grotkopp E., *et al.*, 2005. Ecology of invasive plants: state of the art. *In*: Mooney H. A., Mack R. N., McNeely J. A., Neville L. E., Schei P. J., Waage J. K. (eds). *Invasive alien species: a new synthesis*. Washington, DC, USA, Island Press, 104-161.

Reyes O., Casal M., 2001. Effect of high temperatures on cone opening and on the release and viability of *Pinus pinaster* and *P. radiata* seeds in NW Spain. *Annals of Forest Science*, 59: 327-334. <https://doi.org/10.1051/forest:2002028>

Rigolot E., 2004. Predicting postfire mortality of *Pinus halepensis* Mill. and *Pinus pinea* L. *Plant Ecology*, 171: 139-151. <https://doi.org/10.1023/B:VEGE.0000029382.59284.71>

Sousa W. P., 1984. The role of disturbance in natural communities. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 15: 353-391.

Tassin J., Sarraïlh J.-M., Rivière J.-N., 2007. Essences forestières et invasions : des systèmes de prédiction toujours plus fiables. *Bois et Forêts des Tropiques*, 292 : 71-79. <https://revues.cirad.fr/index.php/BFT/article/view/20350>

Tassin J., Bellefontaine R., Roger E., Kull C. A., 2009. Évaluation préliminaire des risques d'invasion par les essences forestières introduites à Madagascar. *Bois et Forêts des Tropiques*, 299 : 27-36. <https://doi.org/10.19182/bft2009.299.a20420>

Tso B., Mather P., 2009. *Classification methods for remotely sensed data*. 1st ed. Boca Raton, FL, USA, CRC/Taylor and Francis, 352 p.

Tucker C. J., Justice C. O., Prince S. D., 1986. Monitoring the grasslands in the Sahel 1984-1985. *International Journal of Remote Sensing*, 7: 1571-1581. <https://doi.org/10.1080/01431168608948954>

Weismiller R. A., Kristof S. J., Scholz D. K., Anuta P. E., Momin S. A., 1977. Change detection in coastal zone environments. *Photogrammetric Engineering Remote Sensing*, 43 (12): 1533-1539. https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1977journal/dec/1977_dec_1533-1539.pdf

Meliani *et al.* – Contribution des auteurs

Rôle du contributeur	Noms des auteurs
Conceptualisation	A. Meliani, M. E. H. Benderradji, K. Ben Yahia, D. Alatou
Gestion des données	A. Meliani
Analyse formelle	M. Gana
Enquête et investigation	A. Meliani, M. Gana
Méthodologie	A. Meliani, M. Gana
Gestion de projet	M. E. H. Benderradji, D. Alatou
Ressources	M. Gana
Supervision	M. E. H. Benderradji, K. Ben Yahia, D. Alatou
Validation	K. Ben Yahia, D. Alatou
Visualisation	A. Meliani, M. Gana
Écriture – Préparation de l'ébauche originale	A. Meliani
Écriture – Révision et édition	A. Meliani, M. Gana, K. Ben Yahia, D. Alatou

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

Changements d'occupation et d'usage des terres entre 2016 et 2019 dans le Sud-Est de la Côte d'Ivoire : impact des cultures de rente sur la forêt

Tiodionwa Abdoulaye OUATTARA^{1,5}
Koffi Fernand KOUAMÉ^{1,2}
Irié Casimir Zo-Bi³
Romuald VAUDRY⁴
Clovis GRINAND⁴

¹ Centre universitaire de recherche
et d'application en télédétection (CURAT)
22 BP 801, Abidjan 22
Côte d'Ivoire

² Université virtuelle de Côte d'Ivoire
(UVCI)
28 BP 536, Abidjan 28
Côte d'Ivoire

³ Institut national polytechnique
Félix Houphouët-Boigny (INP-HB)
BP 1313, Yamoussoukro
Côte d'Ivoire

⁴ NITIDÆ
29 rue Imbert-Colomés
69001 Lyon
France

⁵ NITIDÆ
Tour Wedge (8^e étage)
Les Caddies, Riviera Golf
Cocody
25 BP 691, Abidjan 25
Côte d'Ivoire

Auteur correspondant /
Corresponding author:
Tiodionwa Abdoulaye OUATTARA –
otiodionwabdoulaye@yahoo.fr



Photo 1.
Cacaoyère « plein soleil » en production (principale culture de la Côte d'Ivoire).
A "full sun" cocoa plantation in production (main crop in Ivory Coast).
Photo T. A. Ouattara.

Doi : 10.19182/bft2021.347.a31868 – Droit d'auteur © 2021, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 16 juin 2020 ;
date d'acceptation : 16 décembre 2020 ; date de publication : 25 février 2021.



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

Citer l'article / To cite the article

Ouattara T. A., Kouamé K. F., Zo-Bi I. C., Vaudry R., Grinand C., 2021. Changements d'occupation et d'usage des terres entre 2016 et 2019 dans le Sud-Est de la Côte d'Ivoire : impact des cultures de rente sur la forêt. Bois et Forêts des Tropiques, 347: 89-104. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2021.347.a31868>

RÉSUMÉ

Changements d'occupation et d'usage des terres entre 2016 et 2019 dans le Sud-Est de la Côte d'Ivoire : impact des cultures de rente sur la forêt

En Côte d'Ivoire, plus de la moitié du couvert forestier (57 %) a disparu en un quart de siècle (1990-2015) avec une perte importante de biodiversité. Pour mieux comprendre les dynamiques en cours et appuyer les politiques de réduction de la déforestation, des cartographies fines et régulières des changements d'occupation et d'usage des terres sont nécessaires. Cependant, ces études sont rarement conduites sur de grands territoires ou bien elles sont parfois obsolètes à cause de la rapidité des processus anthropiques sous-jacents. L'objectif de cette étude est d'évaluer les changements d'occupation et d'usage des terres, en particulier les dynamiques de déforestation et de dégradation forestière dans trois régions du Sud-Est de la Côte d'Ivoire, entre 2016 et 2019. La méthodologie est basée sur l'utilisation d'images Sentinel-2 à 10 et 20 m de résolution spatiale sur une zone d'étude de 22 014 km². Des données d'apprentissage ont d'abord été délimitées en suivant une description de la zone en 16 catégories d'occupation et d'usage des terres. Celles-ci ont ensuite été utilisées avec l'algorithme *Random Forests* pour produire des cartes d'occupation et d'usage des terres en 2016 et 2019 avec une précision globale respective de 92 % et 87 %. Enfin, ces cartes ont été croisées pour décrire les transitions forestières de la zone étudiée. Les résultats révèlent que l'extension des cultures de rente (cacao-café, hévéa et palmier à huile), des cultures et jachères non différenciées ainsi que des infrastructures (habitations et routes) a conduit à un taux de déforestation de 4,95 % par an sur la période étudiée. Cette étude fournit ainsi une compréhension détaillée et actualisée des changements d'occupation et d'usage des terres, et contribue aux réflexions sur la mise en place d'un système national de surveillance des terres.

Mots-clés : occupation et usage des terres, Sentinel-2, déforestation, dégradation des forêts, cacao-culture, *Random Forests*, télédétection, Côte d'Ivoire.

ABSTRACT

Changes in land cover and land use from 2016 to 2019 in south-east Côte d'Ivoire: impacts of cash crops on forests

In Côte d'Ivoire, over half of all forest cover (57%) has been destroyed in a quarter of a century (1990-2015), with considerable loss of biodiversity. In order to support policies aiming to reduce forest losses and to better understand the dynamics at work, detailed and regular mapping of land cover and land use changes is essential. However, mapping studies are rarely conducted over large areas and can quickly become obsolete because of the rapidly evolving human processes underlying changes. This study aims to assess changes in land cover and land use from 2016 to 2019 in three regions of south-eastern Côte d'Ivoire, with a particular focus on the dynamics of deforestation and forest degradation. The methodology is based on the use of images from Sentinel-2 with 10 to 20-metre resolution over a study area covering 22,014 km². Data for training purposes were first marked out according to a description of the zone identifying 16 land cover and land use categories. These were then analysed with the Random Forests algorithm to produce maps of land use and land cover in 2016 and 2019 with an overall precision of 92% and 87% respectively. Finally, the maps were cross-analysed to describe forest transitions in the study zone. The results clearly show that the extension of cash crops (cacao and coffee, rubber and oil palm), undifferentiated crops, fallow lands and infrastructure (dwellings and roads) has caused deforestation at a rate of 4.95% per year over the period investigated. Our study thus provides a detailed and up-to-date picture of changes in land cover and land use and input for discussions on the introduction of a national land use surveillance system.

Keywords: land cover and land use, Sentinel-2, deforestation, forest degradation, cacao crops, *Random Forests*, remote sensing, Côte d'Ivoire.

RESUMEN

Cambios en la ocupación y el uso del suelo entre 2016 y 2019 en el sudeste de Costa de Marfil: impacto de los cultivos comerciales en el bosque

En Costa de Marfil, más de la mitad de la cubierta forestal (el 57 %) ha desaparecido en un cuarto de siglo (1990-2015) con una importante pérdida de biodiversidad. Para apoyar las políticas de reducción de la deforestación y comprender mejor la dinámica actual, es necesario realizar una cartografía fina y constante de los cambios en la ocupación y el uso del suelo. Sin embargo, estos estudios rara vez se llevan a cabo en grandes territorios o a veces son obsoletos debido a la velocidad de los procesos antrópicos subyacentes. El objetivo de este estudio es evaluar los cambios en la ocupación y el uso del suelo, en particular las dinámicas de deforestación y degradación forestal en tres regiones del sudeste de Costa de Marfil, entre 2016 y 2019. La metodología se basa en el uso de imágenes del satélite Sentinel-2 con una resolución espacial de 10 y 20 metros en un área de estudio de 22 014 km². Primero se delimitaron datos de aprendizaje según una descripción de la zona con 16 categorías de uso y ocupación del suelo. A continuación, las imágenes se trataron con el algoritmo *Random Forests* para producir mapas de uso y ocupación del suelo en 2016 y 2019 con una precisión global del 92 % y del 87 % respectivamente. Por último, estos mapas se cruzaron para describir las transiciones forestales en la zona de estudio. Los resultados señalan que la extensión de los cultivos comerciales (cacao-café, árbol de caucho y palma aceitera), los cultivos y el barbecho no diferenciados, así como las infraestructuras (viviendas y carreteras), provocaron una tasa de deforestación del 4,95 % anual durante el periodo estudiado. Por lo tanto, este estudio proporciona un conocimiento detallado y actualizado de los cambios en el uso y la ocupación del suelo, e invita a reflexionar sobre el establecimiento de un sistema nacional de vigilancia del suelo.

Palabras clave: uso y ocupación del suelo, Sentinel-2, deforestación, degradación forestal, producción de cacao, *Random Forests*, teledetección, Costa de Marfil.

Introduction

Depuis la seconde moitié du XX^e siècle, la déforestation en milieu tropical est au centre des débats internationaux (Brou *et al.*, 2005 ; Nakouma *et al.*, 2013). En Afrique de l'Ouest, les conversions des surfaces forestières en terres agricoles sur la période allant de 2000 à 2010 ont été estimées par la FAO à 19 %, ce qui correspond à une perte de surfaces forestières d'environ 870 000 ha/an (FAO, 2010). Selon le Bureau national d'études techniques et de développement (BNETD) et le Secrétariat exécutif permanent de la REDD+ (SEP-REDD+), 57 % des forêts de Côte d'Ivoire ont disparu entre 1990 et 2015, la couverture forestière étant passée de 7,8 millions d'hectares en 1990 à 5,1 millions d'hectares en 2000, puis à 3,4 millions d'hectares en 2015, soit environ 11 % du territoire national (BNETD, 2016 ; FAO, SEP-REDD+, 2017). Les rares forêts rémanentes se trouvent dans le Sud-Ouest du pays, notamment dans le Parc national de Taï (réserve de biosphère et patrimoine mondial de l'UNESCO) et dans la forêt classée du Cavally ainsi que dans le Sud-Est du pays. Malheureusement, ces dernières forêts font de plus en plus l'objet de fortes pressions anthropiques qu'il convient d'endiguer rapidement (Oszwald *et al.*, 2007). En effet, depuis les années 2000, alors que la déforestation régresse globalement sur l'ensemble du territoire national, elle continue de s'accroître dans les forêts classées avec un taux annuel de déforestation passant de 2,9 % entre 1990 et 2000 à 4,2 % entre 2000 et 2015 (BNETD, 2016).

Face à cette situation, l'État Ivoirien a élaboré une nouvelle stratégie de préservation, de réhabilitation et d'extension de ses forêts et en a profité pour se doter d'un nouveau Code forestier en juillet 2019 (Ministère des Eaux et Forêts, 2019). La mise en œuvre de cette stratégie nécessite, entre autres, le suivi régulier de la dynamique d'occupation et d'usage des terres (Jofack Sokeng *et al.*, 2019). Ces nouvelles connaissances constituent en effet une donnée essentielle pour de nombreuses applications scientifiques et opérationnelles, favorisée par l'avènement de nouveaux capteurs et de nouvelles méthodes d'analyse spatiale (Longaretti *et al.*, 2016 ; Thiérion *et al.*, 2017).

En Côte d'Ivoire, le suivi de la dynamique d'occupation et d'usage des terres par télédétection fait face à de nombreux défis. Les défrichements commencent de manière très discrète sur de petites surfaces pour s'étendre progressivement à l'ensemble de la forêt classée ou de l'aire protégée (Nakouma *et al.*, 2013 ; Barima *et al.*, 2016). Dans ce contexte, le recours classique aux images satellitaires de type Landsat (Dibi N'Da *et al.*, 2008 ; Barima *et al.*, 2009) est justifié par la forte disponibilité des archives d'images (sur plus de trente ans) mais peut être limité pour des suivis annuels à cause de leur faible fréquence d'acquisition et résolution spatiale (30 m). La constellation de satellites Sentinel-2 en opération depuis 2015 (Sentinel-2A) et 2017 (Sentinel-2B) fournit gratuitement des images à 10, 20 et 60 m de résolution. Cela représente un fort intérêt pour les institutions du Sud qui ne disposent pas toujours de moyens financiers suffisants à l'acquisition d'images payantes.

L'utilisation de ces capteurs permet d'envisager une plus forte discrimination des modes d'occupation et d'usage des terres et une disponibilité d'images sans nuage. En effet, la zone intertropicale, et en particulier la Côte d'Ivoire, est sujette à de fortes couvertures nuageuses qui limitent l'application de la télédétection optique (Jofack Sokeng *et al.*, 2019). À l'instar de Phiri *et al.* (2020), plusieurs travaux montrent le potentiel des capteurs Sentinel-2 pour contribuer de manière significative à la surveillance terrestre. En Amazonie, des performances supérieures des images Sentinel-2 comparées aux images Landsat-8 ont été enregistrées dans le cadre du suivi de l'exploitation forestière (Lima *et al.*, 2019). En Côte d'Ivoire, ces images ont été utilisées par le BNETD pour cartographier l'occupation du sol en 2016 dans le cadre du projet de Surveillance spatiale des terres (SST) (BNETD, 2019). Cependant, il n'existe pas d'évaluation des changements d'occupation du sol permettant de documenter les dynamiques des paysages, notamment les usages des terres post-déforestation. La seule étude disponible qui s'apparente au sujet traité (BNETD, 2016) s'intéresse uniquement aux pertes de couvert forestier dense humide, à l'aide de données Landsat et l'algorithme Maximum de vraisemblance, sans traiter des modes d'usage des terres post-déforestation. Comme indiqué plus haut, en Côte d'Ivoire, les conversions des forêts sont très rapides, il semble urgent d'explorer de nouvelles techniques de cartographie (données, outils et méthodes) permettant de cartographier les usages des terres annuellement ou à intervalle de temps réduit.

Les techniques de traitement d'images satellitaires ont beaucoup évolué ces dernières années avec l'usage des données Sentinel-2 et celui de plus en plus fréquent d'algorithmes de fouille de données, à l'instar de l'algorithme *Random Forests* (Breiman, 2001 ; Gislason *et al.*, 2006). Cet algorithme a gagné en popularité dans le domaine de la télédétection et a été utilisé pour la cartographie de nombreux indicateurs environnementaux, par exemple la biomasse (Mutanga *et al.*, 2012), le couvert forestier (Niculescu *et al.*, 2018), l'indice LAI (Vuolo et Atzberger, 2014) et l'azote du couvert végétal (Li *et al.*, 2014). Ces études démontrent la supériorité de la qualité des résultats obtenus par cette méthode par rapport aux méthodes conventionnelles, paramétriques et non paramétriques (Verrelst *et al.*, 2015).

La présente étude vise à évaluer les changements d'occupation et d'usage des terres, en particulier les dynamiques de déforestation et de dégradation forestière dans trois régions du Sud-Est de la Côte d'Ivoire, entre 2016 et 2019. La méthodologie développée s'appuie sur les images satellites Sentinel-2, l'algorithme *Random Forests* et un effort de collecte de données d'apprentissage en 16 catégories d'usage des terres. La finalité de ces travaux est d'apporter de nouvelles connaissances afin de contribuer à la gestion durable des terres et à la lutte contre les défrichements illégaux dans les forêts classées et les aires protégées de la Côte d'Ivoire.

Matériel et méthodes

Zone d'étude

La zone d'étude est située dans le Sud-Est de la Côte d'Ivoire. Elle couvre une superficie de 22 014 km² comprise entre 05°06'00" et 07°21'00" de latitude Nord et entre 02°43'00" et 04°11'00" de longitude Ouest (figure 1). Elle se subdivise en trois régions : la région de la Mé dont le chef-lieu est Adzopé, la région du Sud-Comoé (Aboisso) et la région de l'Indénié-Djuablin (Abengourou).

Le choix de cette zone d'étude s'explique par sa grande diversité des catégories d'occupation et d'usage des terres (Brou *et al.*, 2005). En effet, ses paysages sont marqués par une importante mosaïque liée à son histoire agraire et à une forte proportion de forêts secondaires principalement issues des vieilles plantations de cacaoyers, *Theobroma cacao* (Sterculiaceae), et de caféiers, *Coffea arabusca* et *Coffea canephora* (Rubiaceae), abandonnées par leurs propriétaires. La photo 1 présente une cacaoyère « plein soleil » en production (principale culture de rente de la Côte d'Ivoire).

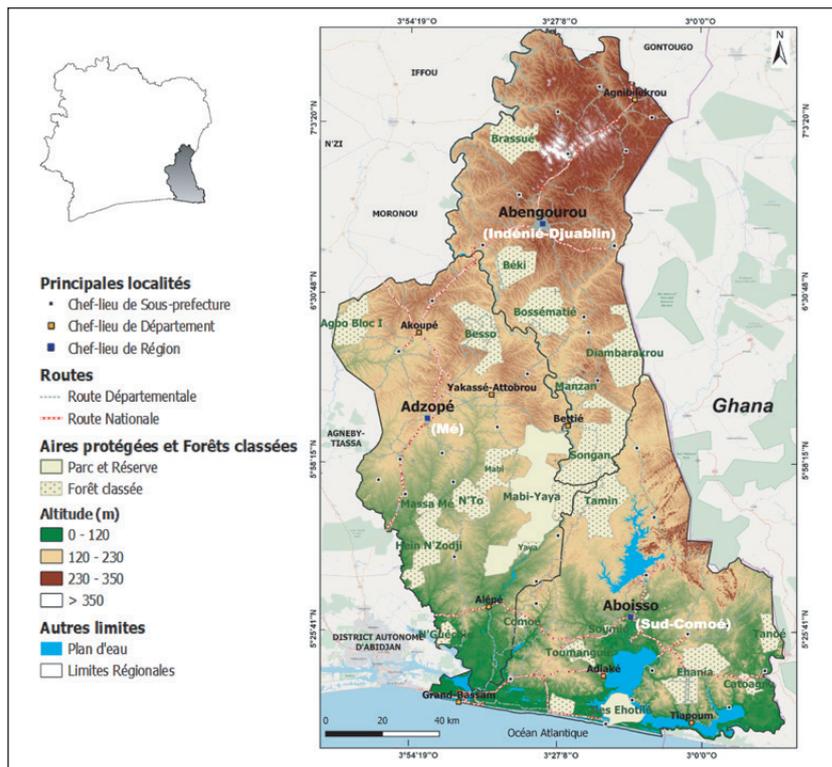


Figure 1.

Situation géographique de la zone d'étude et de trois régions du Sud-Est de la Côte d'Ivoire (Mé, Sud-Comoé et Indénié-Djuablin) ainsi qu'un aperçu du relief, des forêts classées et des aires protégées.

Geographical location of the study area and three regions of South-East Côte d'Ivoire (Mé, Sud-Comoé and Indénié-Djuablin) as well as an overview of the relief, classified forests and protected areas.

Cette zone d'étude abrite par ailleurs 23 forêts classées et deux aires protégées dont la réserve naturelle Mabi-Yaya et le parc national des îles Ehotilé qui est classé site Ramsar. Ces forêts sont menacées de disparition du fait de l'existence d'importants fronts pionniers liés au développement des cultures de rente (Brou *et al.*, 2005). Enfin, c'est dans cette zone du Sud-Est qu'est mis en œuvre le projet REDD+ de la Mé, le tout premier projet pilote REDD+ initié par l'État Ivoirien afin de préserver son patrimoine forestier et environnemental.

La végétation du Sud-Est de la Côte d'Ivoire est celle du domaine guinéen. Elle est située dans le secteur ombrophile caractérisé par la forêt dense humide sempervirente de type *Eremospatha macrocarpa* et *Diospyros mannii* et dans le secteur mésophile correspondant à la forêt dense humide semi-décidue de type *Triplochiton scleroxylon* et *Khaya ivorensis* (Avenard *et al.*, 1971). Le relief est constitué de nombreuses collines dont l'altitude maximale est d'environ 500 m.

Collection d'images satellites

La méthodologie générale appliquée dans cette étude est basée sur le traitement par classification supervisée des images Sentinel-2 (figure 2). Les images couvrant la zone d'étude correspondent à huit scènes d'images d'après le catalogue Copernicus¹. Les meilleures images avec très peu ou pas de couvert nuageux ont été sélectionnées et téléchargées (tableau I). Pour l'année de référence 2016, les images ont été acquises le 6 janvier, et le 11 mars pour l'année de référence 2019. Ces deux dates correspondent à la saison la plus sèche et chaude de la zone étudiée.

Prétraitements des images

Pour les deux années de référence 2016 et 2019, les images Sentinel-2 sont disponibles avec un niveau de prétraitements L1C, c'est-à-dire que ce sont des images orthorectifiées où les valeurs correspondent aux réflectances enregistrées au sommet de l'atmosphère. Elles ont d'abord fait l'objet d'une correction atmosphérique par la méthode DOS1 (*Dark Object Subtraction*) grâce à l'outil « *Semi-automatic Classification Plugin* » de QGIS (Leroux *et al.*, 2018 ; Congedo, 2020). Ensuite, pour couvrir la zone d'étude, une mosaïque de huit scènes Sentinel-2 a été produite sur la base des bandes spectrales (10 m et 20 m de résolution spatiale) rééchantillonnées à 10 m (tableau I).

Délimitation des données d'apprentissage

Une première étape a été de définir la typologie des catégories d'occupation et d'usage des terres pour réaliser les cartographies (tableau II). Cette

¹ <https://www.copernicus.eu/fr>

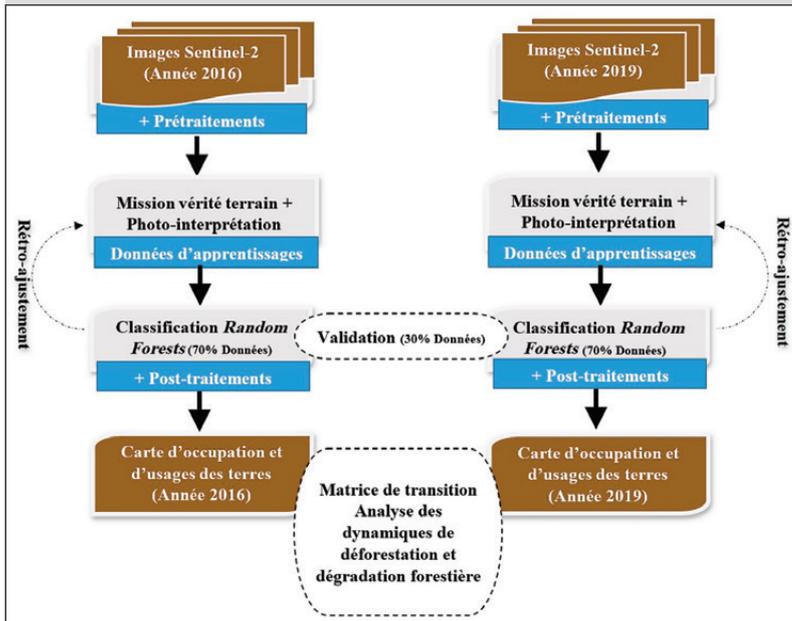


Figure 2. Présentation synthétique de l'approche méthodologique adoptée.
 Synthetic presentation of the methodological approach used.

d'informations dont les images très haute résolution spatiale (THRS) disponibles sur Google Earth et des relevés issus de deux campagnes de terrain. Ces missions de terrain ont été menées respectivement en février 2017 et mai 2017 dans les trois régions étudiées. Les relevés de terrains comprennent non seulement des points d'identification mais aussi des délimitations de parcelles au GPS. Ils ont concerné l'ensemble des catégories de la typologie, dont les principales cultures de rente (cacao-café, hévéa et palmier à huile). La délimitation des données d'entraînement s'est faite suivant l'apprentissage basé sur les connaissances « d'expert » du terrain en insistant sur les limites des parcelles voisines et de catégories différentes dans une même unité de paysage afin d'aider l'algorithme *Random Forest* à trouver les bons seuils de différenciation (figure 3). Enfin, les résultats de la photo-interprétation ont été stockés dans une base de données géolocalisées regroupant l'ensemble des données d'apprentissage. Le tableau II présente les caractéristiques de ces données.

Traitements des données

typologie correspond au niveau 2 du système national de classification des terres. Ensuite, l'étape de délimitation des données d'apprentissage dans un système d'information géographique (SIG) a été réalisée pour calibrer l'algorithme de classification. Pour les algorithmes de fouille de données et en particulier *Random Forest*, la qualité du résultat de la classification est fortement liée à la qualité des données d'apprentissage (Grinand *et al.*, 2013 ; Rakotomala *et al.*, 2015 ; Niculescu *et al.*, 2018). La délimitation a été réalisée par photo-interprétation sur les mosaïques d'images Sentinel-2 de 2016 et de 2019 ainsi que sur d'autres sources

L'algorithme *Random Forests* a été calibré sur la base des données d'apprentissage afin de cartographier les 16 catégories d'occupation et d'usage des terres. Les 10 bandes spectrales Sentinel-2 ont constitué les variables en entrée du modèle (pixels pris aléatoirement dans les données d'apprentissages). En effet, l'utilisation de bandes spectrales uniquement dans un modèle *Random Forests* est un bon compromis entre la précision et le temps de calcul (Pelletier *et al.*, 2016). L'algorithme *Random Forests* nécessite de définir deux importants paramètres, à savoir le nombre maximum d'arbres de classification souhaité (n) et le

Tableau I. Caractéristiques générales des bandes spectrales des images Sentinel-2 utilisées.
 General characteristics of the spectral bands of the Sentinel-2 images used.

Bandes	Résolution spatiale	Longueur d'onde centrale (nm)	Largeur de la bande (nm)	Scènes T30	Dates d'acquisition
2	10 m	490	65	NUM NUN NVL NVM NVN NVP NWL NWM	06/01/2016 et 11/03/2019
3		560	35		
4		665	30		
8		842	115		
5	20 m	705	15		
6		740	15		
7		783	20		
8a		865	20		
11		1 610	90		
12		2 190	180		

Tableau II.

Typologie des catégories d'occupation et d'usage des terres et caractéristiques des données d'apprentissage.
Typology of occupation and land use categories and characteristics of learning data.

Code	Nom Court	Description	Données 2016		Données 2019	
			Polygones	Pixels	Polygones	Pixels
FD	Forêt dense	Formation naturelle de type primaire	181	41 184	197	42 793
FG	Forêt-galerie/ marécageuse	Formation forestière établie sur des sols hydromorphes proches des cours d'eau	48	5 053	42	3 606
FDS	Forêt dégradée/ secondaire	Formation forestière sous influence de la dégradation	284	35 094	389	55 821
T	Teckeraie	Plantation monospécifique de teck	7	351	7	377
CC	Cacao-café	Zone de cultures de cacao et/ou de café	379	33 654	504	48 034
H	Hévéa	Zone de culture d'hévéa	268	39 225	429	59 722
P	Palmeraie	Zone de culture de palmier à huile	105	23 504	169	33 370
B	Bananaïe	Zone de culture de bananier	34	4 164	35	4 632
CJI	Culture/jachère non différenciée	Zone de cultures non encore différenciées, cultures des bas-fonds, cultures annuelles et jeunes jachères (3 à 7 ans)	282	46 168	359	47 167
A	Ananeraie	Parcelle agricole plantée d'ananas	33	4 347	28	5 678
PE	Plan d'eau	Ensemble des retenues d'eau	79	44 065	75	9 113
ZM	Zone marécageuse	Terres humides et bourbeuses constituées de marais et de marécages	51	8 798	49	9 188
H	Habitation	Habitats humains	113	10 909	97	12 602
R	Route	Voies de transport et réseau routier	108	2 081	132	4 771
SN	Sol nu	Terrain dépourvu de couvert végétal	26	1 150	20	1 347
N	Nuage	Nuage	5	2 232	17	38 290
Total			2 003	301 979	2 549	376 511

nombre de variables de prédiction choisies aléatoirement (m) pour chaque nœud des arbres (Breiman, 2001). Nous avons utilisé les valeurs par défaut ($n = 500$ et $m = 3$) qui ont montré des résultats satisfaisants (Rodríguez-Galiano *et al.*, 2012).

Une fois le modèle calibré, l'algorithme a été appliqué pour produire la carte brute d'occupation et d'usage des

terres. Cette carte a été faite de manière itérative, c'est-à-dire par plusieurs allers et retours (étape de rétro-ajustement des données d'apprentissage) entre la photo-interprétation, la calibration et la production de cartes intermédiaires. L'ensemble des traitements a été réalisé avec le logiciel R et le package *randomForest* (Liaw et Wiener, 2002).

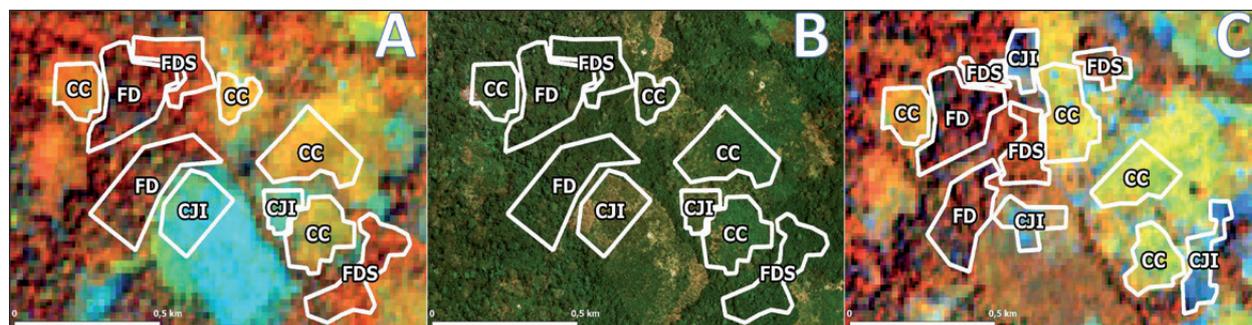
**Figure 3.**

Photo-interprétation et délimitation des données d'apprentissage sur : A. une image composite Sentinel-2 de 2016 avec un affichage en fausses couleurs (R : bande 8 ; G : bande 5 ; B : bande 4) ; B. une image THRS de Google Earth de 2016 ; C. une image composite Sentinel-2 de 2019 avec un affichage en fausses couleurs (R : bande 8 ; G : bande 5 ; B : bande 4). CC : café-cacao ; FD : forêt dense ; FDS : forêt dégradée ou secondaire ; CJI : culture ou jachère Indifférenciée.

Photo-interpretation and delineation of learning data on: A. a 2016 Sentinel-2 composite image with a false colour display (R: Band 8 - G: Band 5 - B: Band 4); B. a 2016 Google Earth THRS image; C. a 2019 Sentinel-2 composite image with a false colour display (R: Band 8 - G: Band 5 - B: Band 4). CC: coffee-cocoa; FD: dense forest; FDS: degraded or secondary forest; CJI: undifferentiated crop or fallow.

Évaluation de la qualité des cartographies

Une validation croisée a été réalisée à partir des outils d'évaluation de la qualité du modèle disponibles dans le package *randomForest*. L'outil permet de calculer un indicateur de précision globale (variance expliquée) et une matrice de confusion à partir d'une sélection aléatoire d'un échantillon test correspondant à 30 % du jeu de données initial, laissé de côté pendant la phase de calibration, et utilisé pour la validation à chaque itération du modèle (échantillon « *Out-Of-the-Bag* » ; Bylander, 2002).

In fine les indicateurs de précision du modèle (précision globale, coefficient Kappa, précision utilisateur et précision producteur) ont été calculés à partir des matrices de confusion obtenues par la validation croisée. Cette méthode de validation croisée permet d'avoir une estimation non biaisée du taux d'erreur en généralisation sans avoir recours à un échantillon test supplémentaire (Chehata *et al.*, 2015).

Post-traitements

Une étape de post-traitements qui inclut un filtrage des résultats des classifications a été abordée afin de les nettoyer des « bruits » et potentielles erreurs (pixels isolés) couramment rencontrés dans les images à haute résolution spatiale (El Garouani *et al.*, 2008). Aussi, cette étape a permis de faire correspondre les cartes aux exigences d'unité minimale de cartographie (UMC). L'UMC adoptée est conforme au Code forestier ivoirien de juillet 2019 qui fixe la superficie minimale des forêts à 0,1 ha. La méthodologie qui a été adoptée pour effectuer les post-traitements se résume en deux étapes : un premier passage de filtre convolutif majoritaire de dimension 3 x 3 pixels pour réduire le bruit ; un second passage de filtre de tamisage d'une taille de 10 pixels, correspondant exactement à 0,1 hectare. Cette UMC a été appliquée pour l'ensemble des catégories d'occupation et d'usage des terres.

Analyse des changements d'occupation et d'usage des terres

L'analyse des changements d'occupation et d'usage des terres s'est appuyée sur le calcul de deux indicateurs statistiques dont la matrice de transition et le taux de changement entre les deux dates (en km² et pourcentage). La matrice de transition permet de mettre en évidence les différentes conversions d'occupation et d'usage des terres entre deux dates et de quantifier ces changements (Barima *et al.*, 2016 ; Kpedenou *et al.*, 2016). Cette matrice ne fournit pas d'informations sur la distribution spatiale des changements. Ainsi, une étape de spatialisation des changements a été réalisée pour évaluer la localisation et la pertinence de ces changements. Pour le calcul des taux de changements annuels, la formule standardisée proposée par Puyravaud (2002) a été utilisée :

$$T = -\frac{1}{t_2 - t_1} \ln \left(\frac{S_2}{S_1} \right) \times 100$$

où S1 et S2 désignent les superficies de la catégorie d'occupation du sol aux dates t1 et t2.

Résultats

Évaluation de la qualité des cartes

Les cartes d'occupation et d'usage des terres de 2016 et de 2019 présentent respectivement des précisions globales de 92 % et 87 % avec des coefficients Kappa de 0,91 et 0,85. Les matrices de confusion des classifications des images Sentinel-2 de 2016 et 2019 présentent des valeurs élevées de précision utilisateur (PU > 75 %) pour l'ensemble des catégories d'occupation et d'usage des terres. On observe cependant des confusions plus marquées : d'une part, entre les forêts dégradées ou secondaires et les autres catégories telles que les forêts denses, les cultures de rente (cacao-café et hévéa) et les cultures ou jachères non différenciées pour les deux dates ; d'autre part, entre les cultures ou jachères non différenciées et les cultures de rente (cacao-café et hévéa). Les deux cartes produites à partir de différents jeux de données d'apprentissage ont sensiblement le même ordre de grandeur d'erreur (PU) par catégorie, avec moins de 2,5 % d'écart en moyenne.

Occupations et usages des terres en 2016 et 2019

Les deux résultats cartographiques montrent que les forêts denses rémanentes restent confinées dans la réserve naturelle de Mabi-Yaya, dans les forêts classées de Bossématié et de N'Guéchié (figure 4). Les estimations indiquent que ces trois forêts protégées renferment à elles seules plus de 30 % des forêts denses des trois régions du Sud-Est du pays. On observe que la forêt classée d'Ehania apparaît comme un bloc agro-industriel. Les cultures de rente de cacao-café sont présentes quasiment sur l'ensemble du Sud-Est. Quant aux cultures industrielles d'hévéa et de palmier à huile, elles dominent dans les parties centre et sud de la zone d'étude.

Changements d'occupation et d'usage des terres entre 2016 et 2019

L'analyse des changements d'occupation et d'usage des terres sur la période de 2016 à 2019 (tableau IV) montre un recul significatif des formations forestières (forêts denses, forêts-galeries et forêts secondaires) au profit des habitations et infrastructures routières, des cultures de rente (cacao-café, hévéa et palmier à huile) ainsi que des cultures et jachères non différenciées. Les formations forestières sont passées de 8 276 km² en 2016 à 7 134 km² en 2019, avec un taux annuel de perte de 4,95 % correspondant à la disparition d'environ 400 km² de formations forestières par an. Les habitations et infrastructures routières ont connu la plus forte expansion (14,57 %) en passant de 321 km² à 498 km² durant la période de 2016 à 2019. Ensuite, les cultures de rente (cacao-café, hévéa et palmier à huile) sont passées de 7 083 km² en 2016 à 7 858 km² en 2019. Elles ont donc connu une expansion annuelle de 3,46 %. Enfin, les cultures et jachères non différenciées ont légèrement augmenté, avec un taux annuel d'expansion de 0,39 %, passant de 4 955 km² en 2016 à 5 013 km² en 2019.

Tableaux III.

Matrices de confusion et précisions des cartes d'occupation et d'usage des terres de 2016 et de 2019 (en nombre de pixels).
PU : précision utilisateur ; PP : précision producteur.

Confusion matrices and accuracies for the 2016 and 2019 land use and occupancy maps (number of pixels).

PU: User Accuracy; PP: Producer Accuracy.

2016	FD	FG	FDS	T	CC	H	P	B	CJI	A	PE	ZM	H	R	SN	N	Total	PU
FD	11 866	6	320	0	45	44	107	0	32	0	0	0	0	0	0	0	12 420	0,96
FG	106	1 062	192	0	107	35	12	1	40	0	15	1	3	0	0	2	1 576	0,67
FDS	524	19	8 915	0	331	315	76	8	257	0	0	4	2	0	0	0	10 451	0,85
T	0	0	1	88	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	96	0,92
CC	29	18	281	0	9 235	136	10	8	326	0	0	65	2	0	0	0	10 110	0,91
H	54	6	263	0	161	10 944	53	2	133	0	0	10	1	1	0	0	11 628	0,94
P	86	1	118	0	19	111	6 737	0	74	1	0	1	8	0	0	0	7 156	0,94
B	0	0	11	0	10	6	0	1 162	18	5	0	1	1	0	1	0	1 215	0,96
CJI	137	9	320	1	551	146	38	1	12 475	3	0	100	85	0	0	1	13 867	0,90
A	0	0	0	0	1	0	0	0	32	1 265	0	3	10	1	0	0	1 312	0,96
PE	58	8	20	0	11	3	4	0	8	0	13 132	0	0	1	0	0	13 245	0,99
ZM	5	6	27	1	153	3	0	1	120	2	0	2 299	0	0	0	2	2 619	0,88
H	0	0	2	0	10	3	1	7	222	8	0	5	3 008	18	2	4	3 290	0,91
R	0	0	15	1	3	3	3	0	68	0	0	0	62	453	4	0	612	0,74
SN	0	0	0	0	0	1	1	2	29	1	0	2	17	7	287	0	347	0,83
N	0	0	2	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	636	649	0,98
Total	12 865	1 135	10 487	91	10 648	11 750	7 042	1 192	13 841	1 285	13 147	2 491	3 199	481	294	645	90 593	
PP	0,92	0,94	0,85	0,97	0,87	0,93	0,96	0,97	0,90	0,98	1,00	0,92	0,94	0,94	0,98	0,99		

2019	FD	FG	FDS	T	CC	H	P	B	CJI	A	PE	ZM	H	R	SN	N	Total	PU
FD	11 437	3	970	0	119	193	150	5	19	0	2	0	0	3	0	0	12 901	0,89
FG	96	343	344	0	125	102	20	6	59	2	12	6	0	1	0	0	1 116	0,31
FDS	1 309	1	12 607	0	1 045	1 032	260	21	315	0	3	6	3	5	0	0	16 607	0,76
T	0	0	2	71	4	11	2	0	38	0	0	1	0	0	0	0	129	0,55
CC	153	2	935	0	12 112	398	46	10	731	10	0	41	2	5	0	0	14 445	0,84
H	193	2	885	1	545	15 721	142	8	244	1	0	15	2	5	0	0	17 764	0,88
P	98	1	203	0	55	122	9 457	3	179	0	0	7	4	6	0	0	10 135	0,93
B	0	0	14	0	9	21	1	1 309	41	1	0	9	2	2	0	0	1 409	0,93
CJI	59	0	308	0	667	213	105	10	12 683	21	8	129	66	32	0	0	14 301	0,89
A	0	0	2	0	2	10	0	3	79	1 576	0	6	7	2	0	0	1 687	0,93
PE	15	5	31	0	8	14	2	1	23	2	2 568	3	0	3	0	0	2 675	0,96
ZM	2	0	16	1	118	27	11	2	454	6	2	2 053	2	5	0	0	2 699	0,76
H	0	0	3	0	4	2	5	0	300	0	0	4	3 413	22	0	9	3 762	0,91
R	0	0	51	0	25	21	8	4	196	5	0	0	33	1 121	0	0	1 464	0,77
SN	0	0	1	0	0	1	2	0	49	0	0	1	40	6	330	1	431	0,77
N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11 502	11 502	1
Total	13 362	357	16 372	73	14 838	17 888	10 211	1 382	15 410	1 624	2 595	2 281	3 574	1 218	330	11 512	113 027	
PP	0,86	0,96	0,77	0,97	0,82	0,88	0,93	0,95	0,82	0,97	0,99	0,90	0,95	0,92	1,00	1,00		

FD : forêt dense ; FG : forêt-galerie/marécageuse ; FDS : forêt dégradée/secondaire ; T : teckeraie ; CC : cacao-café ; H : hêve ; P : palmeraie ; B : bananeraie ; CJI : culture/jachère non différenciée ; A : ananeraie ; PE : plan d'eau ; ZM : zone marécageuse ; H : habitation ; R : route ; SN : sol nu ; N : nuage.

Conversions des formations forestières denses

La matrice de transition a été utilisée pour extraire et analyser plus finement les conversions des formations forestières denses (figure 5), qui comprennent les forêts denses, les forêts-galeries et marécageuses. L'analyse de la carte des changements des formations forestières denses montre que

d'importants changements sont localisés essentiellement dans les forêts classées et les aires protégées. L'analyse statistique correspondante (tableau V) indique que 47 % de ces formations ont subi des changements qui se traduisent principalement par des conversions en forêts dégradées ou secondaires (24 %), en cultures et jachères non différenciées (7 %) et en cultures pérennes de cacao-café (4 %).

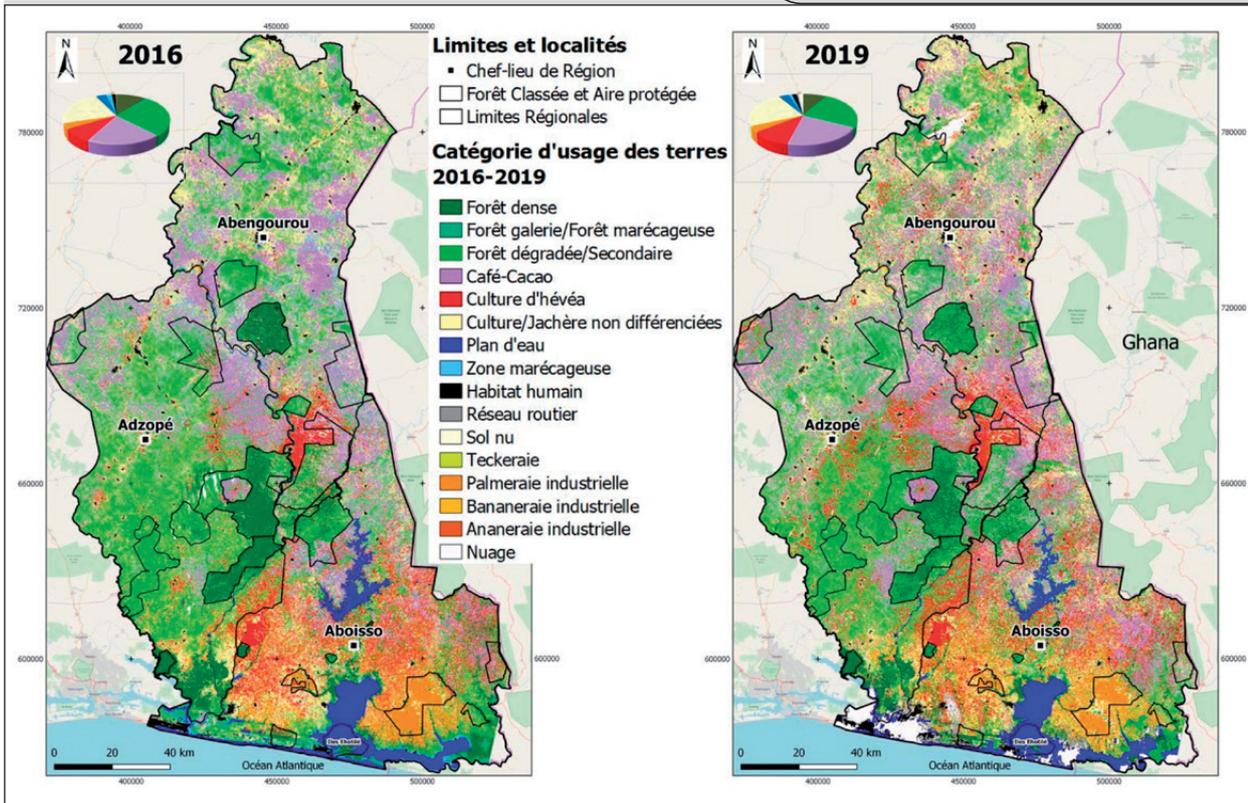


Figure 4. Cartes d'occupation et d'usage des terres et diagrammes de répartition des types d'usage des terres en 2016 et en 2019 dans le Sud-Est de la Côte d'Ivoire.
 Land tenure and land use maps and distribution diagrams of land use types in 2016 and 2019 in south-eastern Côte d'Ivoire.

Tableau IV.

Dynamique d'occupation et d'usage des terres entre 2016 et 2019 dans les trois régions du Sud-Est de la Côte d'Ivoire.
 Land tenure and land use dynamics between 2016 and 2019 in the three south-eastern regions of Côte d'Ivoire.

Catégorie d'occupation et d'usage des terres	2016		2019	
	Surface (km ²)	%	Surface (km ²)	%
Forêt dégradée/secondaire	5 630	25,65	5 276	24,03
Culture/jachère non différenciée	4 955	22,58	5 013	22,84
Cacao-café	4 435	20,20	4 729	21,55
Forêt dense	2 381	10,85	1 842	8,39
Hévéa	1 873	8,53	2 295	10,45
Palmeraie	776	3,53	834	3,80
Plan d'eau	783	3,57	762	3,47
Zone marécageuse	441	2,01	231	1,05
Habitation	300	1,37	363	1,65
Forêt-galerie/marécageuse	265	1,21	16	0,07
Bananaïe	26	0,12	49	0,22
Ananeraïe	22	0,10	33	0,15
Route	21	0,10	135	0,61
Sol nu	2	0,01	13	0,06
Teckeraïe	1	0,00	0	0,00
Nuage	40	0,18	360	1,64
Total	21 951	100	21 951	100

Conversions des forêts dégradées ou secondaires

La même analyse a été réalisée pour localiser et quantifier les conversions des formations forestières dégradées ou secondaires (figure 6). Les résultats montrent que ces formations ont connu de grands changements dans toute la zone d'étude, encore une fois essentiellement localisés dans le domaine rural, mais aussi dans les forêts classées et les aires protégées. L'analyse statistique correspondante (tableau VI) indique que 49 % de ces formations ont subi des changements, principalement par des conversions en cultures pérennes de cacao-café (16 %), en cultures et jachères non différenciées (15 %) ou encore en culture d'hévéa (9 %).

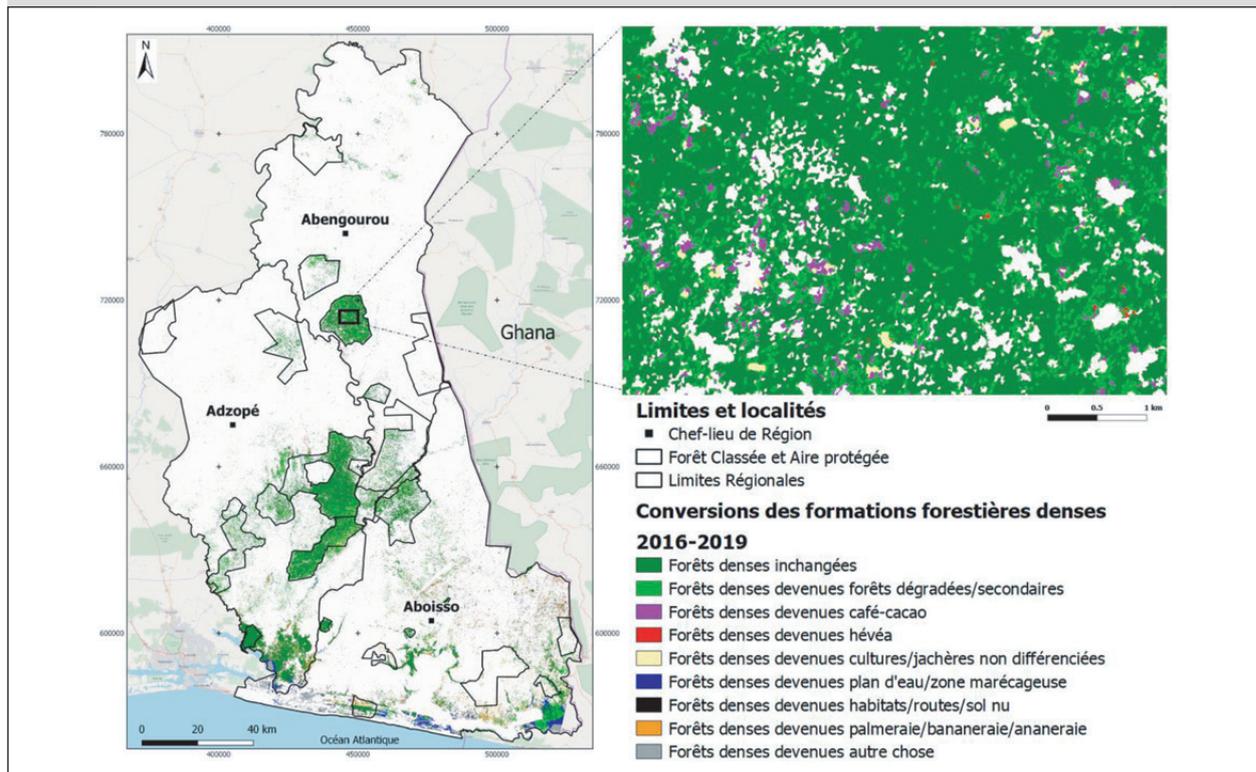


Figure 5.

Conversions des formations forestières denses entre 2016 et 2019 dans le Sud-Est de la Côte d'Ivoire.
Conversions of dense forest formations between 2016 and 2019 in south-eastern Côte d'Ivoire.

Discussion

Évaluation de la qualité des cartes

La validation croisée des deux cartographies (précisions globales de 92 % et 87 % et coefficients Kappa de 0,91 et 0,85) indique que les cartes ont des niveaux de qualité satisfaisants (Pontius, 2000). Ils sont supérieurs aux indicateurs obtenus pour la carte d'occupation du sol de 2016 au niveau national (BNETD, 2019), estimés à 73 % à partir d'une évaluation externe (IGN, 2019). On observe ainsi des valeurs très élevées de précision utilisateur (PU > 75 %). Bien qu'il s'agisse d'échantillons tirés aléatoirement et agrégés pour de nombreuses itérations (validation croisée), les observations utilisées peuvent être géographiquement proches les unes des autres. Il s'agit du phénomène d'autocorrélation spatiale qui génère des indicateurs souvent optimistes, connu pour ce type de validation et souvent ignoré. Pour éviter ce problème lié à la validation croisée, une validation indépendante et externe au processus de cartographie est très souvent nécessaire. D'après les recommandations

Tableau V.

Matrice de transition des formations forestières denses (forêts denses et forêts-galeries/marécageuses) entre 2016 et 2019 dans le Sud-Est de la Côte d'Ivoire.

Transition matrix of dense forest formations (dense forests and gallery/marsh forests) between 2016 and 2019 in south-eastern Côte d'Ivoire.

2019	2016 – Forêt dense et forêt-galerie/marécageuse	
	Surface (km ²)	%
Forêt dense et forêt-galerie/marécageuse	1 393	53
Forêt dégradée/secondaire	630	24
Culture/jachère non différenciée	185	7
Culture de cacao-café	101	4
Autres (teckeraie et nuage)	82	3
Cultures d'hévéa	79	3
Palmeraie, bananeraie et ananaeraie	74	3
Plan d'eau et zone marécageuse	78	3
Habitat, route et sol nu	27	1
Total	2 648	100

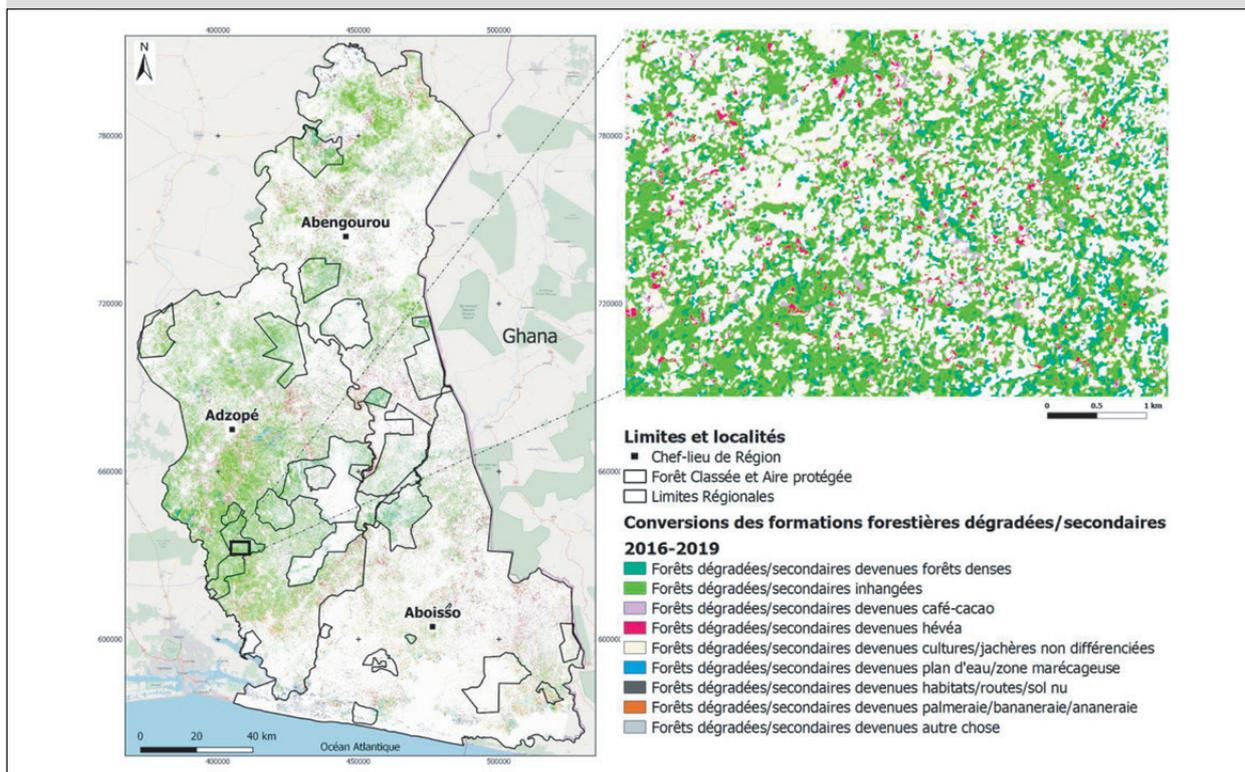


Figure 6. Conversions des formations forestières dégradées ou secondaires entre 2016 et 2019 dans le Sud-Est de la Côte d'Ivoire. *Conversions of degraded or secondary forest formations between 2016 and 2019 in South-East Côte d'Ivoire.*

internationales (Olofsson *et al.*, 2014 ; GOF-GOLD, 2016), la validation externe nécessite des points d'observation de référence issus de campagnes de terrain ou des observations par photo-interprétation sur la base d'images dont la

résolution permet d'identifier clairement l'usage des terres (images THRS < 1 m). Le premier cas est beaucoup plus réaliste sur de petites surfaces mais des difficultés pour garantir une bonne représentativité spatiale et liées au coût se posent

pour des cartographies à large échelle. Le second cas se présente souvent, à l'instar de l'outil *Collect Earth* de la FAO qui facilite ce processus de collecte de données de référence (Bey *et al.*, 2016). Dans cette étude, il n'a pas été possible de conduire une telle évaluation car pour les deux années de référence 2016 et 2019, aucune donnée THRS n'a été acquise ou disponible (couverture complète) sur *Google Earth*. Cette observation est par ailleurs valable pour toute étude diachronique historique ou récente dont l'achat d'images THRS (entre 5 et 10 euros/km²) n'a pas été anticipé ou réalisé. En résumé, cette validation croisée ne peut pas être considérée comme une estimation indépendante de la qualité des deux cartes mais elle donne un aperçu de leur fiabilité et des indications pertinentes sur les confusions entre les catégories sans avoir recours à un échantillon test supplémentaire (Chehata *et al.*, 2015).

Tableau VI.

Matrice de transition des formations forestières dégradées ou secondaires entre 2016 et 2019 dans le Sud-Est de la Côte d'Ivoire. *Transition matrix of degraded or secondary forest formations between 2016 and 2019 in South-East Côte d'Ivoire.*

2019	2016	
	Forêt dégradée/secondaire	
	Surface (km ²)	%
Forêt dégradées/secondaire	2 844	51
Culture de café-cacao	906	16
Culture/Jachère non différenciée	824	15
Cultures d'hévéa	492	9
Forêt dense et forêt-galerie/marécageuse	297	5
Palmeraie, bananeraie et ananeraie	104	2
Autres (teckeraie et nuage)	69	1
Habitat, route et sol nu	55	1
Plan d'eau et zone marécageuse	30	1
Total	5 621	100



Photo 2.
Paysage de forêt fortement dégradée et mosaïque de cultures (forte hétérogénéité).
Heavily degraded forest landscape and cultural mosaic (strong heterogeneity).
Photo T. A. Ouattara.

Utilisation du modèle *Random Forests*

La qualité d'un modèle *Random Forests* est très dépendante de la qualité des données d'apprentissage (Gislason *et al.*, 2006). Ces données doivent être représentatives des catégories d'occupation et d'usage des terres avec une distribution spatiale couvrant l'ensemble de la zone d'étude. Elles doivent également être en nombre suffisant afin de permettre une meilleure prise en compte de la variabilité spectrale des catégories à l'échelle locale (Grinand *et al.*, 2013). L'ajout de parcelles tend à améliorer continuellement les résultats jusqu'à un certain seuil où la carte ne montre plus d'amélioration significative. Certains auteurs ont ainsi observé qu'à partir d'un certain seuil il devient superflu de rajouter des données d'apprentissage pour améliorer les résultats (Pelletier *et al.*, 2016). Dans cette étude, pour garantir la bonne qualité de ces données, la délimitation s'est faite à partir des connaissances « d'expert » du terrain et en insistant sur les limites entre les parcelles voisines dans une même unité de paysage (Grinand *et al.*, 2013 ; Rakotomala *et al.*, 2015). Malgré cet effort, il a été difficile d'obtenir une distribution équitable des données d'apprentissage au sein des catégories. Cela est aussi dû à la taille des catégories sur la zone étudiée. Une autre approche consiste à échantillonner des points de manière aléatoire ou régulière pour l'identification des données d'apprentissage. Bien que plus robuste statistiquement, la limite réside dans le fonctionnement intrinsèque de *Random Forests* qui s'appuie sur des arbres de décision. Ces arbres sont une succession de séparations binaires des valeurs des variables en entrée du modèle (ici réflectance des images satellites) ; l'algorithme détermine automatiquement les seuils de différenciation des catégories d'occupation du sol entre elles. Les échantillons de points très éloignés les

uns des autres ne permettent pas de fournir à l'algorithme les informations nécessaires du passage d'une catégorie d'occupation du sol à une autre (exemple d'une forêt dense à forêt dégradée ou à une parcelle de cacao-café). Le travail de photo-interprétation réalisé dans la zone d'étude est considérable, avec plus de 2 000 polygones (taille moyenne 1,5 ha) pour chacune des dates, et permet d'assurer la consistance et la pertinence spatiale des cartes produites.

Analyse des confusions

Les principales confusions se situent entre les forêts dégradées ou secondaires et les autres catégories telles que les forêts denses, les cultures de rente (cacao-café et hévéa) et les cultures ou jachères non différenciées. Cela traduit la complexité et la forte hétérogénéité des formations forestières observées. Cela a d'ailleurs été une difficulté dans le processus même de photo-interprétation sur les images Sentinel-2. Cette hypothèse explicative a été mentionnée par Dibi N'Da *et al.* (2008) et Jofack Sokeng *et al.*, (2019). À titre d'illustration, la photo 2 présente un paysage de forêt fortement dégradé et des mosaïques de cultures (forte hétérogénéité). En outre, les cultures ou jachères non différenciées pourraient renfermer de très jeunes plantations de cacao et d'hévéa difficilement identifiables sur les images Sentinel-2. Cela pourrait être à l'origine des confusions entre les cultures ou jachères non différenciées et les cultures pérennes (cacao-café et hévéa). Malgré la sélection de la meilleure image disponible sur les années d'étude, la persistance de nuages et des ombres portées réduisent les capacités de discrimination des modes d'occupation et d'usage des terres.

Dynamique de déforestation et de dégradation des forêts

Pour les trois régions du Sud-Est de la Côte d'Ivoire, le taux annuel de déforestation a été estimé à 4,95 % entre 2016 et 2019. Il s'agit d'un des taux de déforestation les plus élevés au monde qui risque d'aboutir à la disparition de l'intégralité des forêts primaires humides du pays en 2024 (Commission européenne, 2019). Ce taux est à mettre en perspective avec celui estimé par le BNEDT (2016) ainsi que la FAO, SEP-REDD+ (2017), entre 2000 et 2015, estimé à 2,66 % par an pour l'ensemble du territoire national et à 3,73 % par an pour les mêmes régions du Sud-Est. L'étude du BNEDT s'est appuyée sur les images Landsat (30 m) et a concerné l'étude de la déforestation de forêts denses. La présente étude a également intégré la déforestation de forêts dégradées ou secondaires afin de tenir compte du couvert forestier dans son ensemble. Il s'agit d'une avancée importante car le territoire concerné par l'étude correspond en grande partie à l'ancienne boucle du cacao, c'est-à-dire la zone originelle d'introduction du cacao à la fin du XIX^e siècle (Oswald *et al.*, 2007). Dans cette zone, de très nombreuses cacaoyères vieillissantes ont été abandonnées par leurs propriétaires et ont donc été largement recolonisées par des espèces arborées au cours des dernières décennies (Oswald *et al.*, 2007). La proportion de forêts dégradées y est donc beaucoup plus importante que dans le reste du pays, comme le montrent les résultats de cette étude.



Photos 3.

Mise à feu d'un arbre dans la forêt classée de la Bossématié à la suite de l'installation de la culture du cacao. (Vue au sol et vue vers le haut montrant la disparition du feuillage.)

Setting fire to a tree in the classified forest of Bossématié following the installation of cocoa cultivation. (Ground view and upward view showing the disappearance of the foliage).

Photo T. A. Ouattara.

Par ailleurs, c'est aussi au cœur de cette ancienne boucle du cacao que se trouvent certaines forêts protégées du pays encore relativement bien préservées, comme le montrent les résultats, avec plus de 50 % des forêts naturelles encore présentes dans ces périmètres. Ces zones exercent un fort pouvoir d'attraction pour les cacaoculteurs en quête de terres, à l'instar de ceux issus du Parc national du Mont Péko en 2016 suite aux opérations de déguerpissement menées par le gouvernement de Côte d'Ivoire (Ousmane *et al.*, 2020).

Pour éviter de se faire repérer à l'intérieur des forêts classées, les cacaoculteurs détruisent le moins possible la végétation existante pendant les premières années de la création d'une exploitation agricole. À mesure que les plantes se développent, les gros arbres sont progressivement dévitalisés sur pied par le feu (photos 3) pour répondre aux besoins croissants de lumière des jeunes cacaoyers. En l'espace de quelques années seulement, on assiste à la dégradation rapide des forêts denses initiales, rapidement converties en plantations pures de cacao. Ce processus de conversion des forêts primaires en cacaoculture (figure 7) via une brève phase de dégradation a aussi été observé par Barima *et al.* (2016). La proportion élevée (47 %) de forêts denses concernées par ce processus explique en partie leur confusion avec les cultures et les jachères non différenciées mentionnées dans cette étude.

Facteurs directs de déforestation et de dégradation des forêts

Les résultats de cette étude mettent en lumière le rôle important de l'hévéaculture dans la réduction du couvert forestier. Cette observation a également été rapportée par Vaudry *et al.* (2016) qui ont fait une analyse qualitative des facteurs de dégradation et de déforestation dans la même région. Ce phénomène est à mettre en lien avec la forte baisse des coûts du latex qui a succédé à la période de la « fièvre de l'hévéa » de 2011 à 2013, occasionnant un pic de déforestation au profit de l'hévéa. Ces travaux viennent également renforcer ceux de Ruf (2012), qui a observé que l'hévéa succède plus souvent aux forêts dégradées et secondaires (9 % des conversions) qu'aux forêts denses (3 %).

Les résultats corroborent également le lien étroit qui existe entre les coûts des produits agricoles sur les marchés internationaux et le rythme de dégradation et de déforestation en Côte d'Ivoire (Ruf, 2012). En effet, les prix élevés offerts aux cacaoculteurs entre 2016 et 2019 expliquent la dynamique de l'hévéa précitée. Ainsi, la cacaoculture est redevenue la principale cause de déforestation. Et ceci quel que soit le type de forêt : forêts denses (4 % des conversions) ou forêts dégradées et secondaires (16 % des conversions) (figure 7).

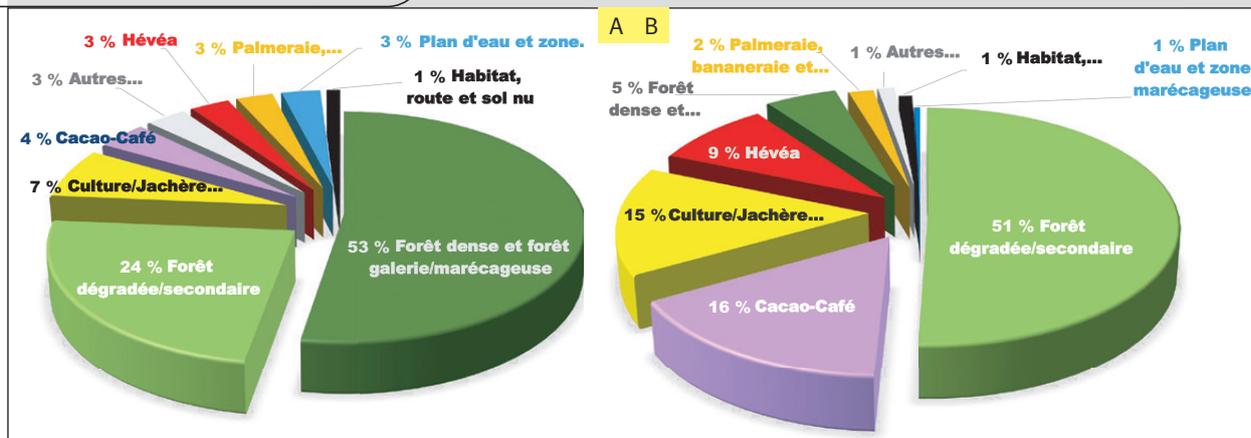


Figure 7.

Analyse des conversions forestières entre 2016 et 2019 concernant : A. les formations forestières denses ; B. les forêts dégradées ou secondaires.

Analysis of forest conversions between 2016 and 2019 regarding: A. dense forest formations; B. degraded or secondary forests.

Vers un système de suivi des terres en Côte d'Ivoire ?

Dans le cadre de sa stratégie nationale REDD+, le ministère de l'Environnement et du Développement durable (MINEDD) a posé les bases d'un système de surveillance spatiale des terres (SST). Les réflexions en cours sur les choix techniques pourraient bénéficier des enseignements tirés de la présente étude. En premier lieu, les résultats de ces travaux démontrent qu'il est possible, avec des niveaux d'incertitude satisfaisants, de détecter la déforestation des forêts dégradées et secondaires en plus des forêts denses. Cela permettrait d'affiner notablement le Niveau d'émissions de référence des forêts (NERF) transmis par la Côte d'Ivoire à la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) (SEP-REDD+, 2017). De plus, ces travaux montrent que ce NERF pourrait également être enrichi avec des données relatives à la détection de la dégradation des forêts, qu'elle soit issue de l'exploitation non durable du bois ou bien de la mutation progressive des forêts denses en cultures pérennes. Au-delà, cela pourrait aider à concrétiser l'Initiative Cacao et Forêts (WCF, 2020) qui, à l'instar du Ghana, envisage de doter la Côte d'Ivoire d'un système performant de suivi des forêts.

D'un point de vue technique, il ne faut pas occulter les difficultés d'acquisition d'images Sentinel-2 exploitables, au regard des fortes couvertures nuageuses en zone tropicale et en particulier en Côte d'Ivoire (présence de cirrus, cumulo-nimbus ou de brume sur l'image). Comme indiqué plus haut, cela affecte le résultat de la cartographie et ce même après l'utilisation d'outils spécifiques pour réduire ces effets. Une solution consisterait à utiliser d'autres outils récemment développés et mis à disposition d'un large public, qui permettent de traiter un volume considérable de données satellites sur une série temporelle dense (ex. Google Earth Engine, SEPAL). Ces outils permettent, entre autres, de produire des compositions d'images « sans nuage », sur une période donnée et en intégrant des masques de nuages et ombres (Pimple *et al.*, 2018). Une autre solution serait d'avoir recours aux données radar Sentinel-1 (Jofack Sokeng *et al.*, 2019). Ces données ont l'avantage de ne pas dépendre du soleil et de ne pas être influencées par

les nuages. Cependant, la limite est la saturation du signal lorsque la végétation est trop dense, ce qui est souvent le cas en zone tropicale (Mitchard *et al.*, 2011).

Dans le cadre du déploiement d'un SST, l'usage des drones permettrait de fournir une information précieuse pour compléter le suivi des forêts. En effet, compte tenu de l'amélioration régulière de leur autonomie et de l'agilité de l'acquisition, les drones présentent un bon potentiel pour la détection précoce des ouvertures de la canopée grâce à une très bonne résolution spatiale de l'ordre du centimètre (Semeki Ngabinzeke *et al.*, 2016, 2018). Enfin, les solutions Lidar (en plein essor à l'instar de ICESAT-2/GLAS) mériteraient en particulier d'être testées pour la détection précoce de la disparition du sous-étage de la forêt (Fayad *et al.*, 2014). En effet, il s'agit d'une limite majeure des outils et méthodes de télédétection actuels que de détecter les parcelles de cacao sous ombrage.

Les technologies mentionnées ci-dessus permettraient à la Côte d'Ivoire de disposer d'outils innovants adaptés à son contexte agroforestier et pour la mise en œuvre de ses objectifs ambitieux de développement durable.

Conclusion

Cette étude a permis de produire des statistiques récentes et fiables sur les types d'occupation et d'usage des terres dans trois régions du Sud-Est de la Côte d'Ivoire conformément à la nomenclature nationale.

L'analyse des changements entre 2016 et 2019 a permis de chiffrer le rythme de conversion des forêts denses et des forêts dégradées ou secondaires. Cette analyse a mis en évidence les processus de dégradation progressive des forêts denses avant que les cultures pérennes de cacao-café, d'hévéa ou de palmier à huile ne soient détectables. Ces travaux ont aussi permis d'identifier et de quantifier les principaux facteurs de déforestation, confirmant les études précédentes. Il s'agit d'une étude pionnière en Côte d'Ivoire en ce qui concerne l'analyse diachronique de l'occupation et de l'usage des terres à partir d'images Sentinel-2 et de l'algorithme d'apprentissage machine *Random Forests*.

Les principales difficultés rencontrées concernent la persistance du couvert nuageux qui réduit considérablement les fenêtres d'acquisition d'images satellites optiques ; elles pourraient être contournées en partie grâce à l'utilisation des nouveaux outils de composition d'images à partir de séries temporelles pour fournir des images sans nuage.

La méthodologie développée dans cette étude, par son potentiel de déploiement à grande échelle et à moindre coût, pourrait grandement intéresser les structures en charge du développement d'un système de surveillance spatiale des terres (SST) et appuyer les politiques de développement durable.

Remerciements

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet REDD+ de la Mé, financé par les Contrats de désendettement et de développement conclus entre la Côte d'Ivoire et la France, et mis en œuvre par Nitidæ en étroite collaboration avec le Secrétariat exécutif permanent de la REDD+ de Côte d'Ivoire. Ce travail s'inscrit aussi dans le cadre de la thèse de doctorat de l'auteur correspondant, sous la direction du CURAT, de l'INP-HB et de Nitidæ.

Références

Avenard J.-M., Eldin M., Girard G., Sircoulon J., Touchebeuf P., Guillaumet J.-L., *et al.*, 1971. Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Paris, France, Orstom, coll. Mémoires de l'Orstom, 50, 391 p. <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:16368>

Barima Y. S. S., Barbier N., Bamba I., Traoré D., Lejoly J., Bogaert J., 2009. Dynamique paysagère en milieu de transition forêt-savane ivoirienne. *Bois et Forêts des Tropiques*, 299 (1) : 15-25. <https://doi.org/10.19182/bft2009.299.a20419>

Barima Y. S. S., Kouakou A. T. M., Bamba I., Sangne Y. C., Godron M., Andrieu J., *et al.*, 2016. Cocoa crops are destroying the forest reserves of the classified Forest of Haut Sassandra (Ivory Coast). *Global Ecology and Conservation*, 8: 85-98. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2016.08.009>

Bey A., Díaz S.-P. A., Maniatis D., Marchi G., Mollicone D., Ricci S., *et al.*, 2016. Collect Earth: Land Use and Land Cover Assessment through Augmented Visual Interpretation. *Remote Sensing*, 8 (10): 807. <https://doi.org/10.3390/rs8100807>

BNETD, 2016. Réalisation d'une étude sur l'identification, l'analyse et la cartographie des causes de la déforestation et de la dégradation des forêts en Côte d'Ivoire. Rapport technique. Abidjan, Côte d'Ivoire, BNEDT, 104 p.

BNEDT, 2019. Maîtrise d'œuvre pour la mise en place du système de surveillance spatiale des terres de la Côte d'Ivoire. Rapport technique. Abidjan, Côte d'Ivoire, BNEDT, 100 p.

Breiman L., 2001. Random Forests. *Machine Learning*, 45 (1): 5-32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>

Brou Y. T., Oszwald J., Bigot S., Servat E., 2005. Risques de déforestation dans le domaine permanent de l'État en Côte d'Ivoire : quel avenir pour ces derniers massifs forestiers ? *Télédétection*, 5 (1-2-3): 263-275. <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010047889>

Bylander T., 2002. Estimating generalization error on two-class datasets using out-of-bag estimates. *Machine Learning*, 48: 287-297. <https://doi.org/10.1023/A:1013964023376>

Chehata N., Ghariani K., Le Bris A., Lagacherie P., 2015. Délimitation des parcelles agricoles par classification d'images Pléiades. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 209 : 165-171. http://recherche.ign.fr/labos/matis/pdf/articles_reuves/2015/RFP209_chehata.pdf

Commission européenne, 2019. Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions. Renforcer l'action de l'UE en matière de protection et de restauration des forêts de la planète. Commission européenne, 12 p.

Congedo L., 2020. Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. Release 7.0.0.1. Document technique, 194 p. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.25480.65286/1>

Dibi N'Da H., N'Guessan E. K., Wajda M. E., Affian K., 2008. Apport de la télédétection au suivi de la déforestation dans le Parc National de la Marahoué (Côte d'Ivoire). *Bulletin - Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 8 (1) : 17-34. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00386032/document>

FAO, 2010. Forest Resources Assessment. Rapport principal. Rome, Italy, FAO, 341 p.

FAO, SEP-REDD+, 2017. Données forestières de base pour la REDD+ en Côte d'Ivoire : Cartographie de la dynamique forestière de 1986 à 2015. Rome, Italie, FAO, 32 p. <https://t.co/CeraHO4jOs>

Fayad I., Baghdadi N., Bailly J. S., Barbier N., Gond V., Mahmoud E. H., *et al.*, 2014. Canopy Height Estimation in French Guiana with LiDAR ICESat/GLAS Data Using Principal Component Analysis and Random Forest Regressions. *Remote Sensing*, 6 (12): 11883-11914. <https://doi.org/10.3390/rs61211883>

El Garouani A., Chen H., Lewis L., Tribak A., Abharour M. 2008. Cartographie de l'utilisation du sol et de l'érosion nette à partir d'images satellitaires et du SIG IDRISI au Nord-Est du Maroc. *Revue Télédétection*, 8 (3) : 193-201. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00434258>

Gislason P. O., Benediktsson J. A., Sveinsson J. R., 2006. Random Forests for land cover classification. *Pattern Recognition Letters*, 27 (4): 294-300. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.08.011>

GOCF-GOLD, 2016. A sourcebook of methods and procedures for monitoring and reporting anthropogenic greenhouse gas emissions and removals associated with deforestation, gains and losses of carbon stocks in forests remaining forests, and forestation. GOCF-GOLD Report version COP22-1. GOCF-GOLD Land Cover Project Office, Wageningen University, The Netherlands, 268 p. http://www.gocf-gold.wur.nl/redd/sourcebook/GOCF-GOLD_Sourcebook.pdf

Grinand C., Rakotomalala F., Gond V., Vaudry R., Bernoux M., Vieilledent G., 2013. Estimating deforestation in tropical humid and dry forests in Madagascar from 2000 to 2010 using multi-date Landsat satellite images and the random forests classifier. *Remote Sensing of Environment*, 139: 68-80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.07.008>

IGN, 2019. Résultats statistiques finaux de la base de données SST dans le cadre du processus de validation. Rapport final. Paris, France, IGN, 21 p.

Jofack Sokeng V., Akpa Y. L., Assoma T., Kouamé F., Corgne S., Rudant J.-P., *et al.*, 2019. Suivi par télédétection des affectations des terres pour la promotion d'une agriculture intégrée au développement forestier en Côte d'Ivoire. Conférence OSFACO : Des images satellites pour la gestion durable des territoires en Afrique, 13-15 mars 2019, Cotonou, Bénin, 17 p. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02189403>

Kpedenou K. D., Boukpepsi T., Tchamie T. T. K., 2016. Quantification des changements de l'occupation du sol dans la Préfecture de Yoto (Sud-Est Togo) à l'aide de l'imagerie satellitaire Landsat. *Revue des Sciences de l'Environnement*, 13 : 137-156. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01409418>

Leroux L., Congedo L., Bellón B., Gaetano R., Bégué A., 2018. Land Cover Mapping Using Sentinel-2 Images and the Semi-Automatic Classification Plugin: A Northern Burkina Faso Case Study. In: Baghdadi N., Mallet C., Zribi M. (eds). QGIS in Remote Sensing SET. Vol. 2: QGIS and Applications in Agriculture and Forest. Wiley, 131-165. <https://doi.org/10.1002/9781119457107.ch4>

Li H., Leung K.-S., Wong M.-H., Ballester P. J., 2014. Substituting random forest for multiple linear regression improves binding affinity prediction of scoring functions: Cyscore as a case study. *BMC Bioinformatics*, 15 (291). <https://doi.org/10.1186/1471-2105-15-291>

Liaw A., Wiener M., 2002. Classification and Regression by randomForest. *R News*, 2: 18-22. <https://cogms.northwestern.edu/cbmg/LiawAndWiener2002.pdf>

Lima T. A., Beuchle R., Langner A., Grecchi R. C., Griess V. C., Achard F., 2019. Comparing Sentinel-2 MSI and Landsat 8 OLI Imagery for Monitoring Selective Logging in the Brazilian Amazon. *Remote Sensing*, 11 (8): 961. <https://doi.org/10.3390/rs11080961>

Longaretti P.-Y., Vannier C., Lasseur R., Lavorel S., 2016. La modélisation des changements d'usage et de couverture des sols comme outil d'aide à la planification territoriale. *Sciences Eaux & Territoires*, INRAE, 21 : 52-57. <https://hal.inria.fr/hal-01685718>

Ministère des Eaux et Forêts, 2019. Stratégie nationale de préservation, de réhabilitation et d'extension des forêts. Abidjan, 68 p.

Mitchard E., Saatchi S., Lewis S., Feldpausch T., Woodhouse I., Sonké B., *et al.*, 2011. Measuring biomass changes due to woody encroachment and deforestation/degradation in a forest-savanna boundary region of central Africa using multi-temporal L-band radar backscatter. *Remote Sensing of Environment*, 115 (11): 2861-2873. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.02.022>

Mutanga O., Adam E., Cho M. A., 2012. High-density biomass estimation for wetland vegetation using WorldView-2 imagery and random forest regression algorithm. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18: 399-406. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.03.012>

Nakouma S., Beltrando G., Atta K. L., Dibi N'Da H., Brou T., 2013. Dynamique forestière et pression urbaine dans le parc national du Banco (Abidjan, Côte d'Ivoire). *Vertigo*, 13 (2). <https://doi.org/10.4000/vertigo.14127>

Niculescu Sr. S., Billel A., Talab-Ou-Ali Jr. H., 2018. Random forest classification using Sentinel-1 and Sentinel-2 series for vegetation monitoring in the Pays de Brest (France). *Proc. SPIE 10783, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XX*, 1078305. <https://doi.org/10.1117/12.2325546>

Olofsson P., Foody M. G., Herold M., Stehman V. S., Woodcock E. C., Wulder A. M., 2014. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, 148: 42-57. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>

Oszwald J., Kouakou Atta J.-M., Kergomard C., Robin M., 2007. Représenter l'espace pour structurer le temps : approche des dynamiques de changements forestiers dans le sud-est de la Côte d'Ivoire par télédétection. *Télédétection*, 7 (1-2-3-4) : 271-282. <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/LETG-COSTEL/halshs-00437064v1>

Ousmane S., Dibi N'Da H., Kouassi K. H., Kouassi K. E., Ouattara K., 2020. Crise politico-militaire et dynamique de la végétation du Parc national du Mont Péko en Côte d'Ivoire. *Bois et Forêts des Tropiques*, 343 : 27-37. <https://doi.org/10.19182/bft2020.343.a31837>

Pelletier C., Valero S., Inglada J., Champion N., Dedieu G., 2016. Assessing the robustness of Random Forests to map land cover with high-resolution satellite image time series over large areas. *Remote Sensing of Environment*, 187: 156-168. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.10.010>

Phiri D., Simwanda M., Salekin S., Nyirenda V. R., Murayama Y., Ranagalage M., 2020. Sentinel-2 Data for Land Cover/Use Mapping: A Review. *Remote Sensing*, 12 (14): 2291. <https://doi.org/10.3390/rs12142291>

Pimple U., Simonetti D., Sitthi A., Pungkul S., Leadprathom K., Skupek H., *et al.*, 2018. Google Earth Engine based three decadal Landsat imagery analysis for mapping of mangrove forests and its surroundings in the Trat province of Thailand. *Journal of Computer and Communication*, 6: 247-264. <https://doi.org/10.4236/jcc.2018.61025>

Pontius Jr. R. G., 2000. Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66 (8): 1011-1016.

Puyravaud J.-P., 2002. Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, 177 (1-3): 593-596. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00335-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00335-3)

Rakotomala F. A., Rabenandrasana J. C., Andriambahiny J. E., Rajaonson R., Andriamalala F., Buren C., *et al.*, 2015. Estimation de la déforestation des forêts humides à Madagascar utilisant une classification multitemps d'images Landsat entre 2005, 2010 et 2013. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 211-212.

Rodríguez-Galiano V. F., Ghimire B., Rogan J., Chica-Olmo M., Rigol-Sanchez J. P., 2012. An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 67: 93-104. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.11.002>

Ruf F., 2012. L'adoption de l'hévéa en Côte d'Ivoire. Prix, mimétisme, changement écologique et social. *Économie Rurale*, 330-331. <https://doi.org/10.4000/economierurale.3527>

Semeki Ngabinzeke N., Linchant J., Quevauvillers S., Kahindo M. J.-P., Lejeune P., Vermeulen C., 2016. Potentiel des véhicules aériens sans pilote dans la détection des activités humaines illégales dans les aires protégées en République Démocratique du Congo. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 4 (2): 151-159. <https://doi.org/10.1139/juvs-2015-0035>

Semeki Ngabinzeke J., Pitchugin M., Linchant J., Vermeulen C., Kahindo Muhongya J.-M., Lejeune P., 2018. Une méthode simple et rapide pour l'évaluation de statistiques d'occupation du sol à l'aide d'images à très haute résolution acquises par mini-drone. *Bois et Forêts des Tropiques*, 335 : 15-23. <https://doi.org/10.19182/bft2018.335.a31497>

SEP-REDD+. 2017. Niveau d'émissions de référence pour les forêts de la Côte d'Ivoire. Présentation à la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques. République de Côte d'Ivoire, 43 p. https://redd.unfccc.int/files/rci_nrf_ccnucc_2017_10.15.pdf

Thiérion V., Herrault P. A., Vincent A., Inglada J., Sheeren D., 2017. Utilisation des séries temporelles d'images Sentinel-2 pour la cartographie de l'occupation du sol dans un contexte de modélisation de la biodiversité. Colloque PAYOTTE 2017, Paris, France. <https://hal.inrae.fr/hal-02738272>

Vaudry R., Nourtier M., Bello A., Traoré Y., 2016. Analyse qualitative des facteurs de la déforestation et de la dégradation des forêts en Côte d'Ivoire. Rapport final. Association Etc Terra, 114 p.

Verrelst J., Rivera J. P., Veroustraete F., Muñoz-Marí J., Clevers J. G. P. W., Camps-Valls G., *et al.*, 2015. Experimental Sentinel-2 LAI estimation using parametric, non-parametric and physical retrieval methods – A comparison. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 108: 260-272. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.04.013>

Vuolo F., Atzberger C., 2014. Improving Land Cover Maps in Areas of Disagreement of Existing Products using NDVI Time Series of MODIS – Example for Europe. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation*, 2014 (5): 393-407. <https://doi.org/10.1127/1432-8364/2014/0232>

WCF, 2020. Cocoa and Forests initiative. Private Sector Report 2018-2019. Washington, DC, USA, World Cocoa Foundation, 53 p.

Ouattara *et al.* – Contribution des auteurs

Rôle du contributeur	Noms des auteurs
Conceptualisation	T. A. Ouattara, K. F. Kouamé, C. Grinand, R. Vaudry
Gestion des données	T. A. Ouattara
Analyse formelle	T. A. Ouattara, C. Grinand
Acquisition du financement	T. A. Ouattara, K. F. Kouamé, I. C. Zo-Bi, C. Grinand, R. Vaudry
Enquête et investigation	T. A. Ouattara, C. Grinand, R. Vaudry
Méthodologie	T. A. Ouattara, K. F. Kouamé, C. Grinand, I. C. Zo-Bi
Gestion de projet	T. A. Ouattara, C. Grinand, R. Vaudry
Ressources	T. A. Ouattara, R. Vaudry
Logiciels	T. A. Ouattara, C. Grinand
Supervision	K. F. Kouamé, I. C. Zo-Bi, C. Grinand, R. Vaudry
Validation	K. F. Kouamé, I. C. Zo-Bi, C. Grinand
Visualisation	T. A. Ouattara, K. F. Kouamé, I. C. Zo-Bi, C. Grinand, R. Vaudry
Écriture – Préparation de l'ébauche originale	T. A. Ouattara, K. F. Kouamé, I. C. Zo-Bi, C. Grinand, R. Vaudry
Écriture – Révision et édition	T. A. Ouattara, K. F. Kouamé, I. C. Zo-Bi, C. Grinand, R. Vaudry

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

Publication de descriptifs techniques extraits de l'Atlas des bois tropicaux

L'Atlas des bois tropicaux publié en 2016 par les Éditions Quæ en [version française](#) (aux formats papier, epub et pdf) puis en 2017 en [version anglaise](#) (aux formats epub et pdf) présente des informations technologiques sur les bois destinées à tous les professionnels qui transforment et mettent en œuvre des bois tempérés ou tropicaux. Il réunit les principales caractéristiques technologiques de 283 essences tropicales et 17 essences de régions tempérées les plus employées en Europe, associées à leurs principales utilisations. Sa réalisation a bénéficié du soutien financier de l'Organisation internationale des bois tropicaux (OIBT), et d'Agropolis Fondation pour la version anglaise. Les descriptifs techniques d'une sélection d'essences tropicales seront régulièrement publiés dans la revue *Bois et Forêts des Tropiques*.

Cet ouvrage est le fruit d'un travail collectif de l'Équipe *Bois tropicaux* du Cirad qui, depuis des décennies, a étudié dans ses laboratoires les caractéristiques technologiques de plus de 1 200 espèces tropicales en réalisant plusieurs centaines de milliers d'essais. La collecte récurrente d'informations sur le terrain est venue compléter ces données pour constituer une base de connaissances qui se décline aujourd'hui sous différents types d'applications.

Outre sa fonction de mémoire collective et de réservoir d'informations pour alimenter des produits documentaires de vulgarisation sur la qualité des bois tropicaux (fiches ou guides techniques, atlas, logiciels, etc.), cette base de connaissances constitue un outil d'étude des relations entre les propriétés des bois et les usages des produits forestiers. Aujourd'hui, les recherches et les études conduites par les chercheurs et les techniciens de l'Unité de recherche BioWooEB du Cirad continuent à alimenter cette base de connaissances sur le comportement technologique et les potentialités d'utilisation d'un nombre toujours plus important d'espèces forestières issues des régions tropicales des quatre continents.

L'Atlas des bois tropicaux décrit les caractéristiques de 300 essences. C'est un outil de référence pour les opérateurs de la filière bois en France et à l'étranger, ainsi que pour les établissements de recherche et d'enseignement, les institutionnels, les donneurs d'ordre, les architectes, les maîtres d'œuvre, les maîtres d'ouvrage et, de façon générale, pour tous les professionnels qui transforment et mettent en œuvre des bois tempérés ou tropicaux, ou qui projettent de le faire. Pour chaque essence, le descriptif technique reprend les informations suivantes : famille et appellation(s) botanique(s), origine géographique, éventuelle restriction commerciale selon la convention de Washington (CITES), description de la grume, description du bois, principales propriétés physiques et mécaniques, durabilité naturelle et imprégnabilité du bois, traitement de préservation, séchage, sciage et affûtage, assemblage, classements commerciaux, réaction au feu, principales utilisations, principales appellations

vernaculaires. Chaque descriptif est illustré par deux photos de débit sur dosse et sur quartier (ou faux quartier), par deux macrophotographies aux grossissements 20 et 115 et par une photo d'un ouvrage construit avec le bois décrit. Les détails sur le contenu de ces descriptifs techniques, sur la nature et l'intérêt des informations, des caractéristiques et des données qu'ils contiennent sont disponibles dans une notice d'informations générales sur le site web de [Bois et Forêts des Tropiques](#), annexée uniquement à la version web de cet article.

Jean GÉRARD

Rédacteur scientifique de la revue *Bois et Forêts des Tropiques* et chercheur de l'Unité de recherche BioWooEB

Référence complète et accès à l'ouvrage :

J. Gérard (coord.), D. Guibal (au.), J.-C. Cerre (au.), S. Paradis (au.), et 40 auteurs, 2016. Atlas des bois tropicaux – Caractéristiques technologiques et utilisations. Éditions Quæ, 1 000 p. <https://www.quae.com/produit/1408/9782759225521/atlas-des-bois-tropicaux>

Doi et accès à la notice d'information générale :

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

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

Date de publication : 25 février 2021



Publication of technical descriptions from the *Tropical Timber Atlas*

The *Tropical Timber Atlas*, published in 2016 by Éditions Quæ [in French](#) (in print, epub and pdf formats) and in 2017 [in English](#) (in epub and pdf formats), presents technological information on wood for all professionals who process and use wood from temperate or tropical species. It covers the main technological characteristics of 283 tropical species and 17 temperate species most commonly used in Europe, together with their main uses. It was produced with financial support from the International Tropical Timber Organization (ITTO) and from the Agropolis Foundation for the English version. Technical descriptions of a selection of tropical species will be published regularly in the *Bois et Forêts des Tropiques* journal.

This book is the outcome of a collective effort by CIRAD's Tropical Timber Team, which for decades has been studying the technological characteristics of more than 1,200 tropical species in its laboratories and has conducted several hundred thousand trials. Recurrent information gathering in the field has supplemented this data to build up a knowledge base that is now applied to a variety of uses.

As well as serving as a collective memory and a repository of information for the production of documentation for non-specialists on the quality of tropical timber (technical guides and data sheets, atlases, software, etc.), this knowledge base is a tool for studying the relationships between wood properties and the uses of forest products.

The studies conducted by researchers and technicians working for CIRAD's BioWooEB Research Unit are continuing to contribute to this knowledge base on the technological behaviour and potential uses of an ever-increasing number of forest species from tropical regions on four continents.

The *Tropical Timber Atlas* describes the characteristics of 300 species. It is a reference tool for operators in the timber industry across the world, as well as for researchers and teachers, institutions, contractors, architects, project managers and, in general, for all professionals who process and use temperate or tropical woods or plan to do so.

For each species, the technical description includes the following: botanical family and name(s), geographical origin, possible trade restrictions under the Washington Convention (CITES), description of the timber log, description of the wood, its main physical and mechanical properties, natural durability and impregnability, wood preservation treatment, drying, sawing and sharpening, assembly, commercial classifications, reaction to fire, main uses, main vernacular names. Each description is illustrated with photos of the wood sawn in the length and half-quarter sawn (or false quarter), two macro-photographs at 20 and 115 magnifications and a photo of a structure built with the wood described.

Details of the content of these technical descriptions, the type of information and areas of relevance and the characteristics and data they contain are available in a general information leaflet on the [Bois et Forêts des Tropiques](#) website, which is attached to the web version only of this article.

Jean GÉRARD

Scientific editor of the *Bois et Forêts des Tropiques* journal and researcher at the BioWooEB Research Unit

Full **reference** and access to the book:

J. Gérard (coord.), D. Guibal (au.), J.-C. Cerre (au.), S. Paradis (au.), and 40 authors, 2016. *Tropical Timber Atlas – Technological characteristics and uses*. Publisher: Éditions Quæ, 1000 p. <https://www.quae.com/produit/1477/9782759227716/tropical-timber-atlas>

Doi and access to the general information leaflet:

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

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

Date de publication : 25 février 2021



Azobé

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.



Faux quartier.
 Photo D. Guibal, Cirad.

Famille. Ochnaceae.

Noms botaniques. *Lophira alata* Banks (syn. *Lophira procera*).

Continent. Afrique.

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

Description de la grume

Diamètre. De 60 à 100 cm.

Épaisseur de l'aubier. De 2 à 4 cm.

Flottabilité. Non flottable.

Conservation en forêt. Bonne.

Description du bois

Couleur référence. Rouge foncé.

Aubier. Bien distinct.

Grain. Grossier.

Fil. Contrefil.

Contrefil. Accusé.

Notes. Bois rouge foncé à brun violacé. Zone intermédiaire entre l'aubier et le bois parfait. Dépôts blancs dans les pores.

Propriétés physiques et mécaniques

Propriété	Valeur moyenne
Densité ⁽¹⁾	1,06
Dureté Monnin ⁽¹⁾	10,7
Coefficient de retrait volumique	0,69 % par %
Retrait tangentiel total (Rt)	10,3 %
Retrait radial total (Rr)	7,3 %
Ratio Rt/Rr	1,4
Point de saturation des fibres	28 %
Conductivité thermique (λ)	0,34 W/(m.K)
Pouvoir calorifique inférieur	19 590 kJ/kg
Contrainte de rupture en compression ⁽¹⁾	96 MPa
Contrainte de rupture en flexion statique ⁽¹⁾	162 MPa
Module d'élasticité longitudinal ⁽¹⁾	21 420 MPa

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

Durabilité naturelle et imprégnabilité du bois

Résistance aux champignons. Classe 2 – 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. Cette essence est mentionnée dans la norme NF EN 350. Le bois de transition a une durabilité variable. Sa résistance aux tarets est bonne dans les eaux tempérées, mais moyenne dans les eaux chaudes. Cette essence est donc considérée comme moyennement durable vis-à-vis des térébrants marins et ne couvre la classe d'emploi 5 que pour une utilisation en milieu marin tempéré ou froid. La durée de performance peut être modifiée par les conditions d'utilisation (telles que décrites par la norme NF EN 335 de mai 2013).

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 collapse. Pas de risque particulier connu.

Notes. Période (3 à 4 mois) de ressuyage (sous abri) recommandée préalablement au séchage artificiel. Séchage très difficile pour des épaisseurs supérieures à 40 mm.

Programme de séchage proposé. Programme n° 7 (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. Non recommandé ou sans intérêt.

Notes. Le sciage par retournement est conseillé (tensions internes). Quelques difficultés au rabotage dues au contrefil.

Assemblage

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

Notes. Bois très 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

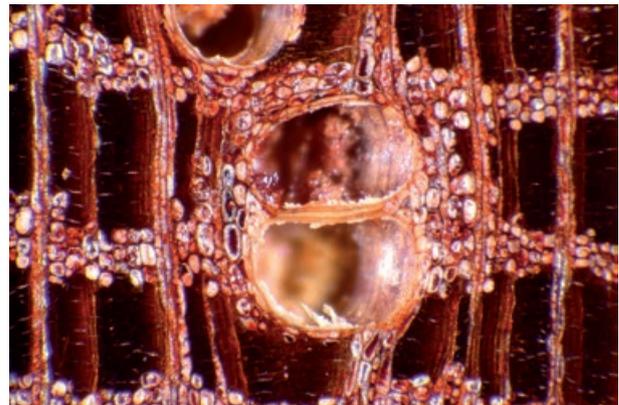
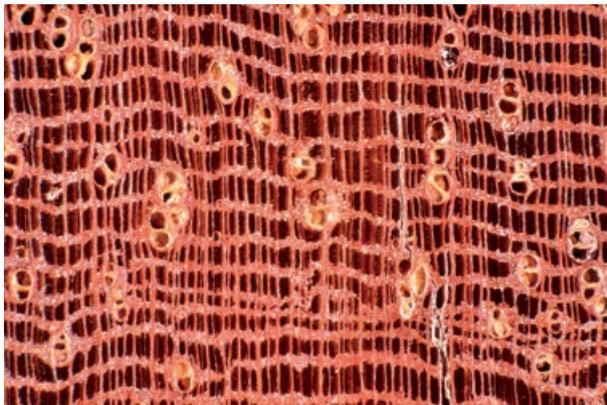
Classements possibles frises et planchettes : choix i, choix II, choix III.

Classements possibles chevrons : choix i, choix II, choix III.

Classement visuel de structure

Conformément à la norme européenne EN 1912 (2012) associée aux normes nationales correspondantes (voir notice explicative), la classe mécanique D70 peut être attribuée par classement visuel. La classe mécanique D50 peut être attribuée par classement visuel conformément à la norme française NF B 52-001-1 (2011).

Sections transversales de *Lophira alata*.
Photo J.-C. Cerre.



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

Charpente lourde.

Escalier d'intérieur.

Fond de véhicule ou de conteneur.

Ossature.

Parquet lourd ou industriel.

Piquet.

Platelage, *decking*.

Pont (en contact avec le sol ou l'eau).

Pont (parties non en contact avec le sol ou l'eau).

Poteaux.

Tonnellerie, cuverie.

Travaux hydrauliques (en eau douce).

Travaux hydrauliques (en milieu maritime).

Traverse.

Notes. En cas d'humidité permanente, le bois de transition doit être éliminé. Résistant à un ou plusieurs acides.

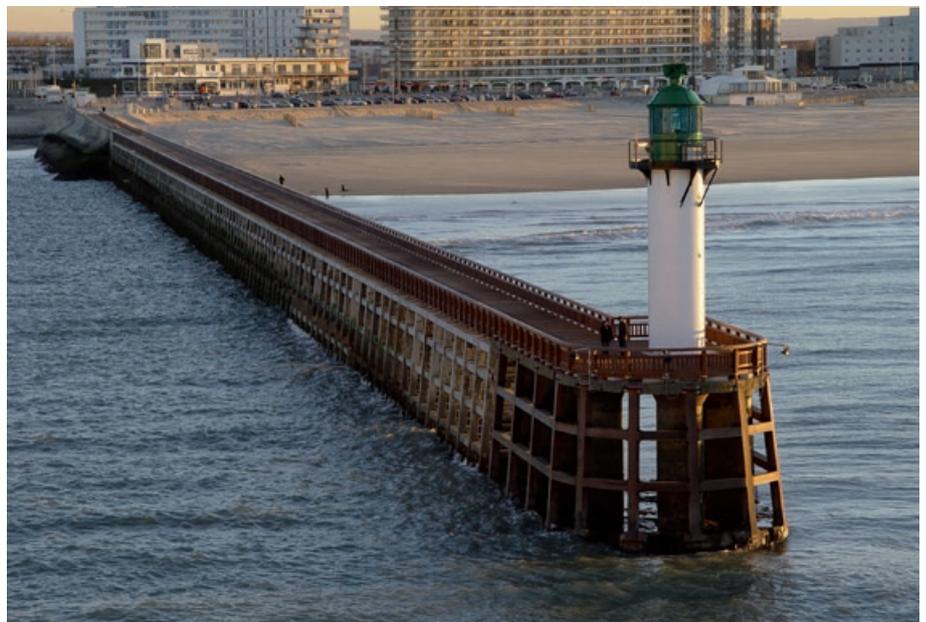
Principales appellations vernaculaires

Pays	Appellation
Allemagne	Bongossi, Bonkole
Bénin	Éki
Cameroun	Bongossi, Okoka
Congo	Bonkolé
Côte d'Ivoire	Azobé
Gabon	Akoga
Ghana	Kaku
Guinée équatoriale	Akoga
Nigéria	Eba, Ekki
République centrafricaine	Kofyo
Royaume-Uni	Ekki
Sierra Leone	Hendui

Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2021.347.a36354>

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

Date de publication : 25 février 2021



Tillac de la jetée de Calais –
 Réalisation Bois et Loisirs (France).
 Photo D. Delequeuche.

Azobé / Ekki*

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 Quae, 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>



Flat sawn.
Photo D. Guibal, Cirad.



Half-quarter sawn.
Photo D. Guibal, Cirad.

* Common commercial name

Family. Ochnaceae.

Botanical names. *Lophira alata* Banks (syn. *Lophira procera*).

Continent. Africa.

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

Log description

Diameter. 60 to 100 cm.

Thickness of sapwood. 2 to 4 cm.

Buoyancy. Does not float.

Log conservation. Good.

Wood description

Reference colour. Dark red.

Sapwood. Clearly demarcated.

Texture. Coarse.

Grain. Interlocked grain.

Interlocked grain. Marked.

Notes. Dark red to purple brown wood. Intermediate zone between sapwood and heartwood. White deposits in the pores.

Physical and mechanical properties

Property	Mean value
Density ⁽¹⁾	1.06
Monnin hardness ⁽¹⁾	10.7
Coefficient of volumetric shrinkage	0.69% per %
Total tangential shrinkage (Ts):	10.3%
Total radial shrinkage (Rs):	7.3%
T/R anisotropy ratio	1.4
Fibre saturation point	28%
Thermal conductivity (λ)	0.34 W/(m.K)
Lower heating value	19,590 kJ/kg
Crushing strength ⁽¹⁾	96 MPa
Static bending strength ⁽¹⁾	162 MPa
Longitudinal modulus of elasticity ⁽¹⁾	21,420 MPa

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

Natural durability and treatability

Resistance to decay. Class 2 – 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 is listed in the NF EN 350 standard. Transitional wood has a variable durability. Good resistance to marine borers in temperate water but moderate resistance in tropical water. This species is thus considered as “moderately durable” for marine borers and covers the use class 5 only when used in temperate or cold salt water, sea water or brackish water. According to the European standard NF EN 335 of May 2013, performance length might be modified by conditions in which it is used.

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.

Notes. Air drying period recommended (3 to 4 months under shelter) prior to kiln drying.

Drying very difficult for thicknesses > 38 mm.

Suggested drying schedule. Schedule #7 (see explanatory note).

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. Not recommended or without interest.

Notes. Log turning sawing recommended (internal stresses). Some difficulties in planing due to interlocked grain.

Assembling

Nailing/screwing. Good but pre-boring necessary.

Notes. Very 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

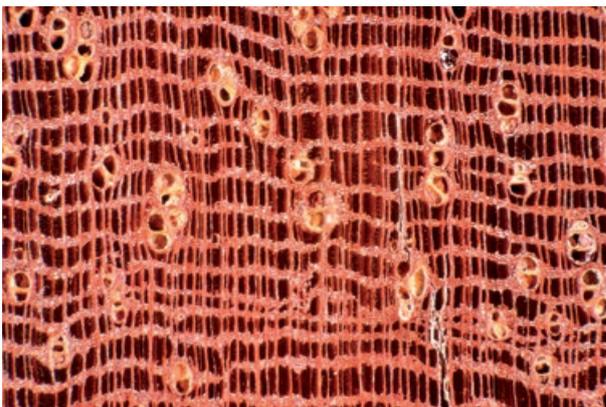
Possible grading for strips and small boards: choice I, choice II, choice III.

Possible grading for rafters: choice I, choice II, choice III.

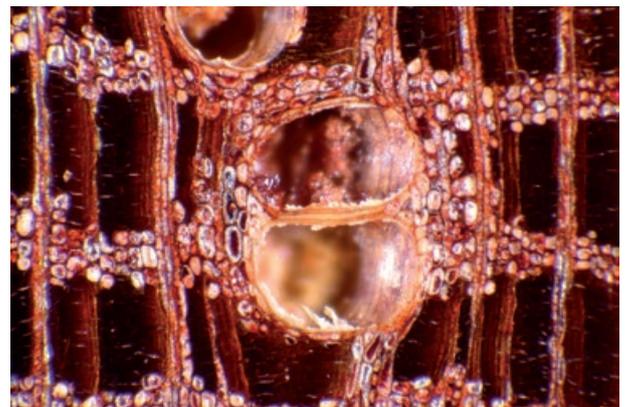
Visual structure grading

According to European standard EN 1912 (2012) and associated national standards (see explanatory note), strength class D70 can be provided by visual grading. Strength class D50 can also be provided by visual grading according to French standard NF B 52-001-1 (2011).

Cross sections of *Lophira alata*.
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

Heavy carpentry.

Stairs (inside).

Vehicle or container flooring.

House framing.

Industrial or heavy flooring.

Stakes.

Decking.

Poles.

Bridges (parts in contact with water or ground).

Bridges (parts not in contact with water or ground).

Cooperage.

Hydraulic works (fresh water).

Hydraulic works (seawater).

Sleepers.

Notes. In case of permanent moisture, the transition wood must be removed. Resistant to one or more acids.

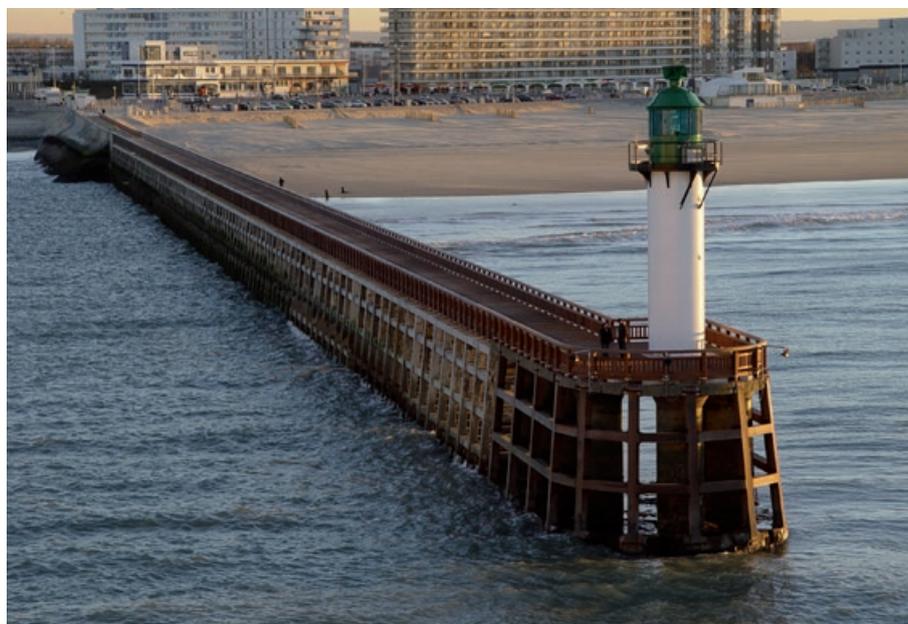
Common names

Country	Local name
Germany	Bongossi, Bonkole
Benin	Éki
Cameroon	Bongossi, Okoka
Congo	Bonkolé
Côte d'Ivoire	Azobé / Ekki
Gabon	Akoga
Ghana	Kaku
Equatorial Guinea	Akoga
Nigeria	Eba, Ekki
Central African Republic	Kofyo
United Kingdom	Ekki
Sierra Leone	Hendui

Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2021.347.a36354>

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

Date de publication : 25 février 2021



“Tillac” on the Calais pier –
Design by Bois et Loisirs(France).
Photo D. Delequeuche.

Bilinga

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.

Famille. Rubiaceae.

Noms botaniques. *Nauclea diderrichii* Merr. (syn. *Sarcocephalus diderrichii*);
 (syn. *Nauclea trillesii*); *Nauclea gillettii* Merr.; *Nauclea xanthoxylon* Aubrév.
 (syn. *Sarcocephalus xanthoxylon*).

Continent. Afrique.

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

Description de la grume

Diamètre. De 60 à 90 cm.

Épaisseur de l'aubier. De 3 à 5 cm.

Flottabilité. Non flottable.

Conservation en forêt. Bonne.

Description du bois

Couleur référence. Jaune orangée.

Aubier. Bien distinct.

Grain. Moyen.

Fil. Contrefil.

Contrefil. Accusé.

Notes. Bois parfait jaune doré ou jaune orangé légèrement moiré. En utilisation intérieure, la couleur du bois est stable.

Propriétés physiques et mécaniques

Propriété	Valeur moyenne
Densité ⁽¹⁾	0,76
Dureté Monnin ⁽¹⁾	5,3
Coefficient de retrait volumique	0,55 % par %
Retrait tangentiel total (Rt)	7,5 %
Retrait radial total (Rr)	4,5 %
Ratio Rt/Rr	1,7
Point de saturation des fibres	25 %
Conductivité thermique (λ)	0,25 W/(m.K)
Pouvoir calorifique inférieur	19 600 kJ/kg
Contrainte de rupture en compression ⁽¹⁾	63 MPa
Contrainte de rupture en flexion statique ⁽¹⁾	95 MPa
Module d'élasticité longitudinal ⁽¹⁾	14 660 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 2 – moyennement imprégnable.

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

Notes. Cette essence est mentionnée dans la norme NF EN 350. Le Bilinga couvre naturellement la classe d'emploi 5 (bois immergé de manière régulière ou permanente dans l'eau salée, eau de mer ou eau saumâtre). La durée de performance peut être modifiée par les conditions d'utilisation (telles que décrites par la norme NF EN 335 de mai 2013).



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. Peu élevé.

Risque de cémentation. Pas de risque particulier connu.

Risque de fentes. Élevé.

Risque de collapse. Pas de risque particulier connu.

Notes. Bois difficile à sécher en raison du contrefil accusé. Débits sur quartier conseillés afin d'éviter les défauts.

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

Sciage et usinage

Effet désaffûtant. Normal.

Denture pour le sciage. Acier ordinaire ou allié.

Outils d'usinage. Ordinaires.

Aptitude au déroulage. Mauvaise aptitude au tranchage. Bonne.

Assemblage

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

Notes. Bois présentant une légère tendance à la fente lors du clouage. Ce bois est acide, en tenir compte lors du collage.

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.

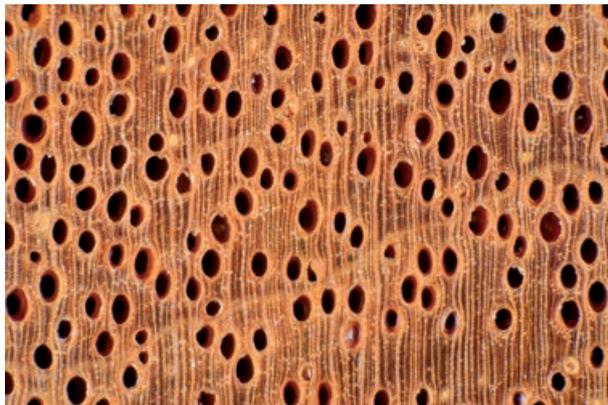
Classements possibles chevrons : choix I, choix II, choix III.

Classement visuel de structure

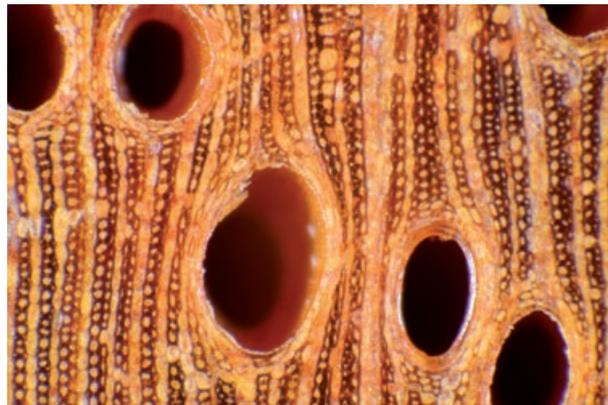
Conformément à la norme européenne EN 1912 (2012) associée aux normes nationales correspondantes (voir notice explicative), la classe mécanique D50 peut être attribuée par classement visuel. La classe mécanique D35 peut être attribuée par classement visuel conformément à la norme française NF B 52-001-1 (2011).

Sections transversales de *Nauclea diderrichii*.

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

Charpente lourde.

Construction navale (bordé et pont).

Ébénisterie (meuble de luxe).

Fond de véhicule ou de conteneur.

Lambris.

Menuiserie intérieure.

Meuble courant ou éléments meublants.

Parquet.

Parquet lourd ou industriel.

Placage tranché.

Platelage, *decking*.

Pont (en contact avec le sol ou l'eau).

Pont (parties non en contact avec le sol ou l'eau).

Poteaux.

Revêtement extérieur.

Travaux hydrauliques (en milieu maritime).

Traverse.

Notes. Sous climat sec et chaud, risques de fentes pour les utilisations extérieures. Un bouche-porage est nécessaire. Résistant à un ou plusieurs acides.

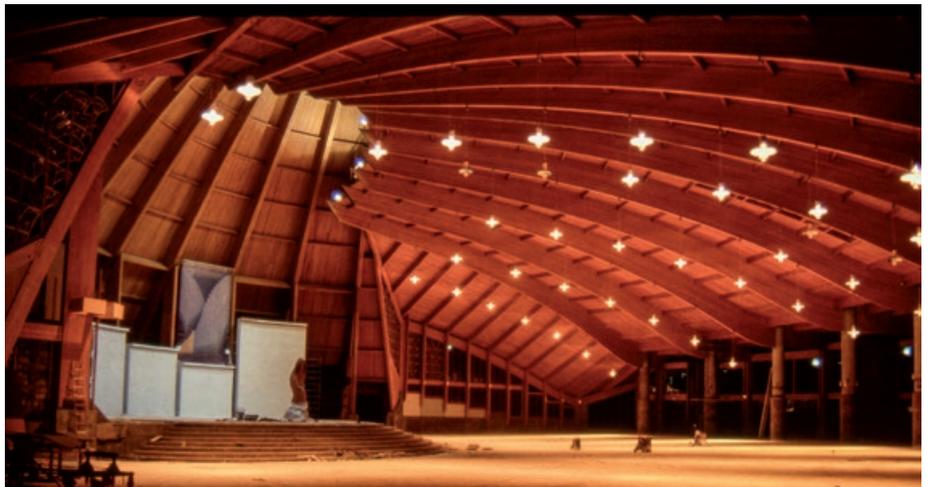
Principales appellations vernaculaires

Pays	Appellation
Allemagne	Aloma
Angola	Engolo
Bénin	Opépé
Cameroun	Akondoc
Congo	Linzi, Mokessé, N'gulu-maza
Côte d'Ivoire	Badi
Gabon	Bilinga
Ghana	Kusia
Guinée équatoriale	Aloma
Nigeria	Opepe
Ouganda	Kilingi
République centrafricaine	Kilu
République démocratique du Congo	N'gulu-maza, Bonkingu
Royaume-Uni	Opepe
Sierra Leone	Bundui

Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2021.347.a36355>

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

Date de publication : 25 février 2021



Structure intérieure en lamellé-collé du sanctuaire marial de Mvolye, Yaoundé (Cameroun).
 Photo J. Uhalde, UBC.

Bilinga / Opepe*

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>

* Common commercial name Family.

Family. Rubiaceae.

Botanical names. *Nauclea diderrichii* Merr. (syn. *Sarcocephalus diderrichii*);

(syn. *Nauclea trillesii*); *Nauclea gillettii* Merr.; *Nauclea xanthoxylon* Aubrév.

(syn. *Sarcocephalus xanthoxylon*).

Continent. Africa.

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

Log description

Diameter. 60 to 90 cm.

Thickness of sapwood. 3 to 5 cm.

Buoyancy. Does not float.

Log conservation. Good.

Wood description

Reference colour. Orange yellow sapwood.

Clearly demarcated texture. Medium.

Grain. Interlocked grain.

Interlocked grain. Marked.

Notes. Wood is a perfect golden yellow or slightly moiré orangey yellow. In interior end-uses, the colour remains stable.

Physical and mechanical properties

Property	Mean value
Density(1)	0.76
Monnin hardness(1)	5.3
Coefficient of volumetric shrinkage	0.55% per %
Total tangential shrinkage (Ts):	7.5%
Total radial shrinkage (Rs):	4.5%
T/R anisotropy ratio	1.7
Fibre saturation point	25%
Thermal conductivity (λ)	0.25 W/(m.K)
Lower heating value	19,600 kJ/kg
Crushing strength(1)	63 MPa
Static bending strength(1)	95 MPa
Longitudinal modulus of elasticity(1)	14,660 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 2 – moderately treatable.

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

Notes. This species is listed in the NF EN 350 standard. Bilinga naturally covers the use class 5 (wood permanently or regularly submerged in salt water, sea water or brackish water). According to the European standard NF EN 335 of May 2013, performance length might be modified by conditions in which it is used.



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. Slight risk.

Risk of case hardening. No known specific risk.

Risk of checking. High risk.

Risk of collapse. No known specific risk.

Notes. Difficult to dry due to high interlocked grain. Quarter sawn recommended to reduce defects.

Suggested drying schedule. Schedule #6 (see explanatory note).

Sawing and machining

Blunting effect. Normal.

Tooth for sawing. Ordinary or alloy steel.

Machining tools. Ordinary suitability for peeling. Bad suitability for slicing. Good.

Assembling

Nailing/screwing. Good but pre-boring necessary.

Notes. Wood presents slight tendency to split when nailing. Wood is acidic: to be taken into account when gluing.

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

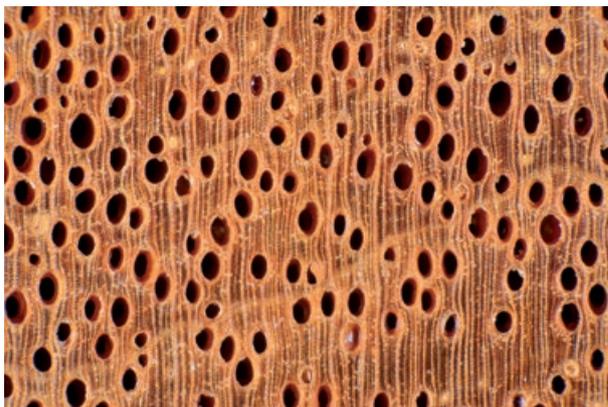
Possible grading for strips and small boards: choice I, choice II, choice III

Possible grading for rafters: choice I, choice II, choice III

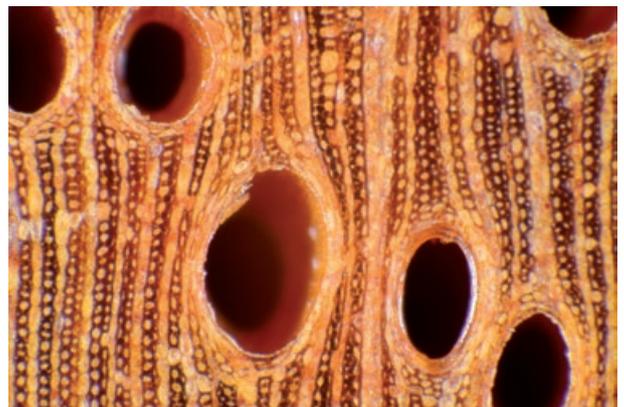
Visual structure grading

According to European standard EN 1912 (2012) and associated national standards (see explanatory note), strength class D50 can be provided by visual grading. Strength class D35 can also be provided by visual grading according to French standard NF B 52-001-1 (2011).

Cross sections of *Nauclea diderrichii*.
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

Heavy carpentry.

Ship building (planking and deck).

Cabinetry (high-end furniture).

Vehicle or container flooring.

Panelling.

Interior joinery.

Built-in furniture or mobile item.

Flooring.

Industrial or heavy flooring.

Sliced veneer.

Decking.

Bridges (parts in contact with water or ground).

Bridges (parts not in contact with water or ground).

Poles.

Exterior panelling.

Hydraulic works (seawater).

Sleepers.

Notes. Risk of splitting in outdoor uses in dry, hot environments. Needs filling before polishing. Resistant to one or several acids.

Common names

Country	Local name
Germany	Aloma
Angola	Engolo
Benin	Opépé
Cameroon	Akondoc
Congo	Linzi, Mokessé, N'gulu-maza,
Côte d'Ivoire	Badi
Gabon	Bilinga
Ghana	Kusia
Equatorial Guinea	Aloma
Nigeria	Opepe
Uganda	Kilingi
Central African Republic	Kilu
Democratic Republic of Congo	N'gulu-maza, Bonkingu
United Kingdom	Opepe
Sierra Leone	Bundui

Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2021.347.a36355>

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

Date de publication : 25 février 2021

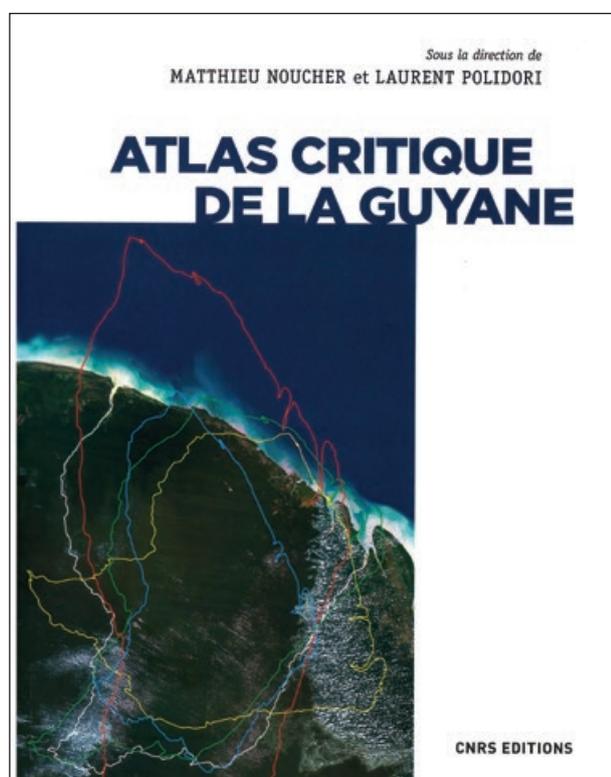


Glued laminated indoor structure at the Mary Queen of the Apostles Basilica in Yaoundé (Cameroon). Photo J. Uhalde, UBC.

NOUCHER M., POLIDORI L. (DIRS), 2020.

ATLAS CRITIQUE DE LA GUYANE.

FRANCE, CNRS ÉDITIONS, 331 P.



La carte n'est pas le territoire. Œuvre de l'esprit, interprétation de l'espace, elle est restée longtemps l'apanage du pouvoir, l'expression des dominants, véhiculant des représentations partiales, douteuses ou orientées. Une mise en ordre qui fabrique parfois l'ordre bien réel de nos sociétés. Dressé dans les années 1970, ce constat critique bouleverse encore aujourd'hui la lecture des cartes. Cet atlas s'inscrit dans ce mouvement intellectuel en plein essor : il se veut être un exercice de cartographie critique appliquée à un espace donné. Les auteurs, géographes spécialistes de la discipline, ont choisi la Guyane – mais leur méthode pourrait s'appliquer à n'importe quel « terrain » – parce qu'elle forme un espace singulier, une « île » méconnue, rebelle aux méthodes classiques de représentation (par l'immensité du massif amazonien, difficilement accessible). Région à forts enjeux politiques et économiques, ses cartes voient s'affronter des visions très différentes, des divergences de regards sur l'Histoire. Cet ouvrage questionne des cartes existantes en procédant à une analyse virtuose de tous les grands problèmes de leur fabrication (confiner, délimiter, détecter, collecter, nommer) à leur usage (mesurer, planifier, révéler, figer, relier). Il traite aussi des thèmes cruciaux de cet espace en produisant pour ce faire des cartes originales sur les frontières, le littoral, la forêt, les circulations, l'orpillage, la toponymie, la topographie, le foncier, l'urbanisme, les relations géopolitiques, la biodiversité... Tandis que les deux derniers chapitres « Imaginer, la Guyane par les cartes » et « Oublier, le blanc des cartes » réinterrogent la carte jusque dans la logique de ses suppositions ou de ses omissions. En multipliant les points de vue, cet atlas fait émerger les co-vérités d'un territoire, divers, complexe à décrire, sans jamais pouvoir y arriver complètement, comme s'il y avait pour cette « île » et le monde en général une impossibilité, un « in-cartographiable » irréductible. Plus de 80 contributeurs (géographes, cartographes, sociologues, historiens, anthropologues, archéologues, ethno-botanistes, linguistes, etc.) ont participé à cet ouvrage collectif coordonné par Matthieu Noucher et Laurent Polidori, chercheurs au CNRS.



WEFE Nexus Science Advances conference postponed to May 2021

Conference on Water-Energy-Food-Ecosystems Nexus scientific advances in the Mediterranean region

ANNOUNCEMENT

The unpredictability of the evolution of the Covid-19 pandemic in many countries may cause serious constraints for travelling in the next few months. We have therefore decided to postpone the WEFE Nexus Science Advances conference to May 2021. We think that this is the best course of action to limit risks to the participants and retain the possibility of a face-to-face high-level dialogue with Mediterranean partners. In the meantime, we will continue working with all of you to prepare for this event.

The current epidemic has highlighted the crucial role of research and innovation, and the need for evidence-based and science-grounded policy-making. Reinforced cooperation between scientists and stakeholders in the WEFE (water, energy, food, ecosystems) sectors will also contribute to the fight against global pandemics such as Covid-19. Food security and agricultural livelihoods, access to safe water and sanitation, reconstruction of the relationship between humans and ecosystems are indeed key elements of social and health protection programmes.

The WEFE Nexus science should be ready to confront the additional challenges that were highlighted by the pandemic and embed them in the discussions prior to the conference. Shifting the event will permit sharing content and ideas through preparatory virtual meetings. We invite all partners to continue their engagement with this conference, whose theme is more important than ever.

Information: <https://prima-med.org/events/conference-on-water-energy-food-ecosystems-wefe-nexus-scientific-advances-in-the-mediterranean-region/>

