



# Bois & forêts

des  
tropiques

1<sup>er</sup> trimestre 2024  
n° 359

# Bois & forêts des tropiques

Revue éditée par le Cirad  
n° 359 / 1<sup>er</sup> trimestre 2024

## Rédaction en chef

Kévin Candelier  
Marie-France Thévenon  
Jean-François Trébuchon

## Rédacteurs scientifiques

Vincent Freycon  
Antoine Galiana  
Valéry Gond  
Jean Gérard  
Romain Lehnebach  
Jacques Tassin

## Coordination éditoriale

Jean-François Trébuchon

## Comité éditorial 2023-2025

Mariam Ben Said (Maroc)  
Richardson Barbosa Gomes da Silva (Brésil)  
Stéphanie Carrière (France)  
Pascal Danthu (France)  
Chauvelin Douh (République du Congo)  
Mohamed Tahar Elaieb (Tunisie)  
Belkacem El Amrani (Maroc)  
Gerard Nounagnon Gouwakinnou (Bénin)  
Patrick Heuret (France)  
Dalila Kherchouche (Algérie)  
Nassima Lassouane (Algérie)  
Anne Larson (Indonésie)  
Lucas Jose Mazzei de Freitas (Brésil)  
Bernard Mallet (France)  
Jean-Yves Meyer (France)  
Blandine Marie Ivette Nacoulma (Burkina Faso)  
Oumeldjilali Naggar (Algérie)  
Junior Ngaba (Cameroun)  
Florence Bobélé Niamke (Côte d'Ivoire)  
Amadé Ouédraogo (Burkina Faso)  
Éric Penot (France)  
Romain Pirard (Afrique du Sud)  
Khelaff Rabhi (Algérie)  
Josoa Randriamalala (Madagascar)  
Flavio Ruffinatto (Italie)  
Er-riyahi Saber (Maroc)  
Boutheina Stiti (Tunisie)  
Jose Antonio Sierra-Huelsz (Mexique)  
Irié Casimir Zo-Bi (Côte d'Ivoire)

## Graphistes

Pierre-Yves Bled, Sophie Bureau

## Correctrice

Sophie Bureau

## Correctrice d'épreuve en français

Tina Brognoli

## Traductrices

Ilona Bossanyi, Anna Lon Quintana

## Service de presse

Laurence Campas  
Jean-François Trébuchon

## Webmestre

Jean-François Trébuchon

## Directrice de publication

Élisabeth Claverie de Saint Martin



## Relecteurs ayant contribué à l'évaluation des articles en 2023/

### Reviewers who have contributed to the evaluation of articles in 2023

Amah Akodewou, Méline Aubry Kientz, Sabas Barima, Roger Bayala, Jacques Beauchene, Benjamin A. Bell, Gaël Bouka, Charles Bracke, Christian Brischke, Kévin Candelier, Cyrille Chatelain, Pierre Couteron, Jérémie Damay, Maaïk De Ridder, Aurélie Deveau, Kangbeni Dimobe, Charles Doumenge, Emilien Dubiez, Marc Ducouso, Vincent Freycon, Antoine Galiana, Jean Gérard, Philippe Gérardin, Valéry Gond, Bayé-Niwah Claudette Gormo, Frédéric Guibal, Philippe Guizol, Cécile Richard-Hansen, Babar Hassan, Achille Hounkpèvi, Lydie-Stella Koutika, Saïd Lahssini, Patrick Langbour, Anne Larson, Romain Lehnebach, Dominique Louppe, Bernard Mallet, Jean Noël Marien, Lucas Jose Mazzei de Freitas, Adriana Molina, Carla Morsello, Rostand Moutou Pitti, Mhadi Mubarak, Blandine Marie Ivette Nacoulma, Angélique Navarro Martinez, Patricia Negreros-Castillo, Bobelê Florence Niamké, Fernando Nunes Gouveia, Johan Oszwald, Amadé Ouédraogo, Régis Peltier, Eric Penot, Adrien Péroches, Uday Pimple, Romain Pirard, Tahiana Ramanantoandro, Josoa Randriamalala, Jean-Marc Roda, Julian Rode, Lone Ross, Er-Riyahi Saber, Tahar Sghaier, José Antonio Sierra-Huelsz, Josiane Seghieri, K. Marie Laure Sougoti-Guissou, Olivier Sounigo, Chloé Tankam, Boalidioa Tankoano, Jacques Tassin, Marie-France Thévenon, Bernard Thibaut, Emmanuel Torquebiau, Jean-François Trébuchon, Gede Wibawa, Philippe Vigneron, Andrew Wong, Irié Casimir Zo-Bi, Placide Zoungrana, Javier Zumaeta.

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

**revues.cirad.fr**

© Bois et forêts des tropiques © Cirad

ISSN 0006-579X

ISBN: 978-2-87614-843-7 (PDF)

ISBN: 978-2-87614-842-0 (relié)

Dépôt légal : février 2024

283997X - Imprimé en Belgique par CIACO SC,  
rue de Rodeuhaie, 27, 1348 Louvain-la-Neuve,  
Belgique

Maquette : Pierre-Yves Bled, Sophie Bureau,  
Curvalle, France

Numéro d'inscription à la CPPP : 59465

Directrice générale : E. Claverie de Saint Martin

## Impression du numéro à la demande

consulter [le site web](#) 16doc : 80 €/exemplaire

**Version papier** abonnement annuel de 4

numéros :

France : **300 €/an ttc**

Autres pays de l'Union européenne : **300 €/an ht**

Pays hors Union européenne : **350 €/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>



Parc national de Daintree, forêt reconnue comme  
étant la plus ancienne forêt tropicale humide au  
monde, Queensland, Australie.

*Daintree National Park, a forest recognised as the  
oldest tropical rainforest in the world, Queensland,  
Australia.*

Photo K. Candelier.

La Ciaco est une coopérative de production de papeterie,  
d'imprimerie et de librairie. Les papiers utilisés sont TFC  
ou ECF, labellisés FSC ou PEFC. Les encres sont sans solvant  
et non toxiques. L'imprimerie est autonome en énergie  
électrique avec des équipements solaires produisant  
de l'énergie renouvelable nécessaire à la production.

## 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 du comité de  
lecture composé des rédacteurs en chef, des rédacteurs  
scientifiques, et des membres du comité éditorial, avant  
envoi aux relecteurs. Après acceptation, des corrections  
ou modifications sont proposées aux auteurs.  
Les opinions émises par les auteurs n'engagent pas la  
responsabilité de la rédaction.



## Politique d'Accès Libre

### Open Access policy

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



## La licence utilisée est

Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

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

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

## ÉDITORIAL

- Printemps et Journées internationale et mondiale des forêts, du bois et de l'eau** 3  
 M.-F. THÉVENON, K. CANDELIER, J.-F. TRÉBUCHON

## ARTICLES SCIENTIFIQUES

- Développement des équations de volume total et des volumes à diamètre et longueur variables des grumes d'arbres individuels du pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.) en Tunisie** 5  
 I. ESSOUSSI, T. SGHAIER
- Amélioration des chaînes de valeur pour les petites plantations d'*Acacia* dans le cadre de l'alliance coopérative de Thừa Thiên Huế, Vietnam** 27  
 T. H. HO, V. INGRAM, S. IWANAGA, T. T. M. NGUYỄN
- Examen analytique des méthodes et outils d'évaluation des dommages causés aux cultures par les éléphants : implications des nouvelles technologies de l'information** 39  
 C. A. E. N'SAFOU MBANI, S. NGAMA, M. N. TCHAMBA, A. A. SHIDIKI, C. GNACADJA
- Adopter des inventaires forestiers à dire d'acteurs pour les forêts communautaires camerounaises** 55  
 A. REBOUD, L. MBONAYEM, G. LESCUYER
- Les indices polliniques des populations de *Cedrus atlantica* Manetti varient en fonction des localités géographiques dans les zones montagneuses de l'Atlas au Maroc** 69  
 C. SENHOR, F.-E. SAOUAB, M. BENDRISS AMRAOUI
- Prioria balsamifera* (Vermoesen) Breteler et *Prioria oxyphylla* (Harms) Breteler : traits d'histoire de vie et perspectives pour des recherches futures** 85  
 V. BBIDJO, C. MANDE, F. MBAYU, R. KATUSI, J. LISINGO

## RÉSUMÉ DE THÈSE

- Économie du secteur de la biomasse lignocellulosique durable et logistique des biocarburants en Malaisie** 97  
 CHU LEE ONG

## VOS LECTURES

- 26, 54, 84  
**van Hensbergen H., Shono K., Cedergren J. A guide to multiple-use forest management planning for small and medium forest enterprises.** 99
- Nelson C. R. et al. Standards of practice to guide ecosystem restoration – A contribution to the United Nations Decade on Ecosystem Restoration 2021–2030.** 100

## ACTES DE CONFÉRENCE

- Conférence de l'IUFRO : « Défis globaux et gestion innovante des foreurs de l'écorce et du bois dans les forêts plantées et naturelles ». Institut Européen de la Forêt Plantée IEFC, 29-31 août 2023 – Bordeaux, France. Actes de la conférence.** 96

## CONFÉRENCES INTERNATIONALES

- ATBC 2024, 60<sup>e</sup> réunion annuelle de l'Association pour la Biologie Tropicale et la Conservation : « Réaliser une science inclusive pour une conservation, une adaptation et une résilience efficaces dans les tropiques ». 14-18 juillet 2024 – Kigali, Rwanda.** 101
- Atelier Cosmétopée ultramarine 2024 à La Réunion. 30 et 31 mai 2024 – Saint Pierre, La Réunion, France.** 102





## EDITORIAL

- Spring and International and World Forest, Wood and Water Days** 3  
M.-F. THÉVENON, K. CANDELIER, J.-F. TRÉBUCHON

## SCIENTIFIC ARTICLES

- Development of equations of total volume and volumes of logs with variable diameter and length for individual maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) tree in Tunisia** 5  
I. ESSOUSSI, T. SGHAIER
- Improving *Acacia* smallholder plantation value chains in Thừa Thiên Huế cooperative alliance, Vietnam** 27  
T. H. HO, V. INGRAM, S. IWANAGA, T. T. M. NGUYỄN
- Analytical review of methods and tools for assessing crop damage caused by elephants: implications of new information technologies** 39  
C. A. E. N'SAFOU MBANI, S. NGAMA, M. N. TCHAMBA, A. A. SHIDIKI, C. GNACADJA
- Stakeholder-led inventories of community-managed forests in Cameroon** 55  
A. REBOUD, L. MBONAYEM, G. LESCUYER
- Pollen indices of *Cedrus atlantica* Manetti populations vary with geographical localities in the Moroccan Atlas Mountains** 69  
C. SENGHOR, F.-E. SAOUAB, M. BENDRISS AMRAOUI
- Prioria balsamifera* (Vermoesen) Breteler and *Prioria oxyphylla* (Harms) Breteler: life-history traits and prospects for future research** 85  
V. BBIDJO, C. MANDE, F. MBAYU, R. KATUZI, J. LISINGO

## PHILOSOPHIÆ DOCTOR ABSTRACT

- Economics of sustainable lignocellulose biomass and biofuel logistics in Malaysia** 97  
CHU LEE ONG

## BOOK REVIEW

- 26, 54, 84  
**van Hensbergen H., Shono K., Cedergren J. A guide to multiple-use forest management planning for small and medium forest enterprises.** 99
- Nelson C. R. et al. Standards of practice to guide ecosystem restoration – A contribution to the United Nations Decade on Ecosystem Restoration 2021–2030.** 100

## CONFERENCE PROCEEDINGS

- IUFRO conference: "Global challenges and innovative management of bark and wood borers in planted and natural forests". European Institute of Planted Forest IEFC, 29<sup>th</sup>-31<sup>st</sup> August 2023 – Bordeaux, France. Book of abstracts.** 96

## INTERNATIONAL CONFERENCES

- ATBC 2024, 60<sup>th</sup> Annual Meeting of The Association for Tropical Biology and Conservation: "Achieving Inclusive Science for Effective Conservation, Adaptation, and Resilience in the Tropics". 14<sup>th</sup>-18<sup>th</sup> July 2024 – Kigali, Rwanda.** 101
- Ultramarine Cosmetopoeia 2024 workshop in La Réunion. 30<sup>th</sup>-31<sup>st</sup> May 2024 – Saint Pierre, La Réunion, France.** 102

# Printemps et Journées internationale et mondiale des forêts, du bois et de l'eau

L'équinoxe de printemps, symbole de renouveau dans plusieurs régions du monde, se célèbre en mettant souvent à l'honneur des éléments de la nature. Le printemps annonciateur de jours longs, lumière, bourgeons et fleurs, se décline à l'envi selon les pays et on l'accueille de manière festive et différente : avec des couleurs (*Holi*) en Inde<sup>1</sup> et au Népal ; des feux de joie, une table et une gastronomie toute particulière pour *Nowrouz*<sup>1</sup> (jour de l'an) en Asie centrale ; en admirant les fleurs de cerisier (*Hanami*) au Japon, et avec tant de chants, de poèmes, toutes cultures confondues.

C'est aussi en cette période de l'année que l'Organisation des Nations Unies a proclamé la Journée internationale des forêts<sup>2</sup> et la Journée mondiale de l'eau<sup>3</sup>, les 21 et 22 mars respectivement, auxquelles s'est adossée la Journée mondiale du bois soutenue par la World Wood Day Foundation<sup>4</sup> (reconnue par l'Organisation des Nations Unies), nous rappelant ainsi le

nexus entre l'eau, la forêt et le bois. Aborder les liens complexes et multiples entre eau, forêt et bois, leurs différentes facettes, les variantes et variables associées, les changements, les modèles, les prévisions et perspectives, est un travail titanesque devant agglomérer des champs de compétences immenses et variés.

Ces Journées internationale et mondiale ont vocation à donner de la visibilité à des enjeux majeurs en permettant une sensibilisation du plus grand nombre via les pouvoirs publics et la société civile. Chaque année, ces Journées internationale et mondiale abordent un thème et en 2024, « Forêts et innovation : de nouvelles solutions pour un monde meilleur » côtoiera « La diversité des bois dans la Culture » et « L'eau pour la paix ».

Sans eau, pas de vie, pas de forêt et pas de bois, est un poncif. L'eau est nécessaire à la germination des graines, à la croissance des arbres et autres végétaux. Les arbres produisent, entre autres, du bois : un matériau utilisé depuis des temps immémoriaux, stock de carbone pendant sa durée de vie, recyclable et biodégradable. La forêt, quant à elle, assure des fonctions écosystémiques considérables : (1) un service de



## Photos 1.

Parc national de Daintree, forêt reconnue comme étant la plus ancienne forêt tropicale humide au monde, de l'ère du Gondwana, et abritant une faune et une flore impressionnante et exceptionnelle dont la plupart n'existent qu'en Australie, est inscrite au patrimoine mondial de l'UNESCO<sup>5</sup> pour sa biodiversité sans égal. Elle est localisée au nord de l'état du Queensland, en Australie, à la limite climatique et latitudinale des forêts tropicales humides. Contrairement à la plupart des autres forêts saisonnières, tropicales et équatoriales à feuillage persistant, cette forêt est sujette à une saison sèche et à des événements cycloniques fréquents.

*Daintree National Park, a forest recognised as the oldest tropical rainforest in the world, dating back to the Gondwana era, and sheltering impressive and exceptional flora and fauna, most of which only exist in Australia, is listed as a UNESCO World Heritage Site<sup>5</sup> for its unrivalled biodiversity. It is located in northern Queensland, Australia, at the climatic and latitudinal limits of tropical rainforests. Unlike most other seasonal, tropical and equatorial evergreen forests, this forest is subject to a dry season and frequent cyclonic events.*

Photos K. Candelier.

<sup>1</sup> UNESCO, Patrimoine culturel immatériel, <https://ich.unesco.org/>

<sup>2</sup> Organisation des Nations Unies, Journée internationale des forêts, <https://www.un.org/fr/observances/forests-and-trees-day>

<sup>3</sup> Organisation des Nations Unies, Journée mondiale de l'eau, <https://www.un.org/fr/observances/water-day>

<sup>4</sup> World Wood Day Foundation, <http://www.worldwoodday.org/foundation.php>

<sup>5</sup> Unesco, Convention du patrimoine mondial, <https://whc.unesco.org/fr/list/486>



**Photo 2.**

En Guyane française, les peuples autochtones, Lokono, Pahikweneh, Teko, Kali'na Teleuyu, Wayampi, et Wayana<sup>6</sup>, se sont installés le long des fleuves, et ont toujours gardé des liens très étroits avec l'eau, la forêt et le bois. Fleuve Kourou, Guyane française.

*In French Guiana, the indigenous peoples - Lokono, Pahikweneh, Teko, Kali'na Teleuyu, Wayampi and Wayana<sup>6</sup> - settled along the rivers, and have always maintained very close links with water, forest and wood. Kourou River, French Guiana.*

Photo K. Candelier.

production de ressources multiples ; (2) un service de régulation (des sols, de l'air, du cycle de l'eau et des températures) permettant un bon fonctionnement de l'écosystème, le maintien de la biodiversité (photos 1), le stockage de CO<sub>2</sub> et l'atténuation du réchauffement climatique ; (3) un service sociétal et culturel<sup>7</sup>. Les forêts couvrent 4,06 milliards d'hectares et contiennent plus de la moitié du stock de carbone (dans les sols et les végétaux), et les bassins versants forestiers et zones humides fournissent 75 % de l'eau douce accessible et dont plus de la moitié de la population mondiale est tributaire (Sarre, 2019).

Outre ces faits à exposer et/ou à rappeler pendant ces Journées internationale et mondiale, l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture<sup>7</sup> (FAO) a dégagé des messages clés à transmettre. Innovations et technologies développées ces dernières années : (1) permettent d'utiliser de nouveaux moyens importants de surveillance des forêts et de communiquer et d'échanger des informations à ce sujet ; (2) sont nécessaires pour mettre un terme à la déforestation et à la dégradation des forêts, en particulier lors des incendies ; (3) donnent des moyens aux populations autochtones de cartographier et protéger des terres coutumières (photo 2) ; (4) contribuent à trouver des solutions pour la restauration des écosystèmes, afin de

limiter le réchauffement climatique. De plus, la recherche relative aux produits forestiers ligneux ou non, permettra de trouver des matériaux de construction, mais aussi de nouvelles molécules, fibres et solutions pour la chimie innovante de substitution ou non.

Ces messages clés, se déclineront différemment selon les zones géographiques, les interlocuteurs et le niveau décisionnel des parties prenantes. À l'innovation technologique, qu'elle soit incrémentale, transformatrice ou disruptive, il faudra ajouter des considérations politiques, de formations et de rémunérations afin que ces innovations profitent aux innovateurs, ainsi qu'aux communautés et aux acteurs qui les mettront en œuvre (Nasi, 2024).

Au regard des enjeux, des innovations, des gouvernances à venir, il apparaît crucial de publier les nouvelles connaissances relevant de questions scientifiques souvent socialement vives, en adoptant une évaluation rigoureuse et impartiale (Bergandi, 2018). En les partageant librement, *Bois et Forêts des Tropiques* et toute son organisation contribueront sans relâche à leur

transmission et à la progression certaine du savoir. Ainsi, à l'issue du cycle inexorable des saisons, le printemps prochain et ces Journées internationale et mondiale seront sans doute annonciateurs de nouveautés et de découvertes qu'il nous faudra continuer à diffuser.

**Marie-France Thévenon<sup>1</sup>, Kévin Candelier<sup>1</sup>,  
Jean-François Trébuchon<sup>2</sup>  
Rédactrice et rédacteurs en chef de la revue  
*Bois et Forêts des Tropiques***

<sup>1</sup> Cirad, UPR BioWooEB ; <sup>2</sup> Cirad, UPR Forêts et Sociétés.

**Références**

Nasi R., 2024. L'innovation en foresterie : ou se produit-elle ? Pourquoi est-elle importante ? CIFOR-ICRAF. <https://forestsnews.cifor.org/87018/linnovation-en-foresterie-ou-se-produit-elle-pour-quoi-est-elle-importante?fnl=fr>

Sarre A., 2019. Editorial. Unasylva - Revue internationale des forêts et des industries forestières, 70 (1) : 3. <https://www.fao.org/forestry/unasylva/fr>

Bergandi D., 2018. Les sciences impliquées entre objectivité épistémique et impartialité engagée. In : Et si la recherche scientifique ne pouvait pas être neutre ? Brière L., Lieutenant-Gosselin M., Piron F. (eds.). Éditions science et bien commun, chapitre 13 : 275-293. <http://hdl.handle.net/20.500.11794/34463>

<sup>6</sup> Organisation des Nations autochtones de Guyane (ONAG), <https://www.ohchr.org/sites/default/files/Documents/Issues/IPeoples/EMRIP/Session13/submissions/LAC/2020-12-03-organisationdesnations-autochtones-de-guayane-nag.pdf>

<sup>7</sup> Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations, International Day of Forest 2024, Key messages, <https://www.fao.org/international-day-of-forests/key-messages/>

# Développement des équations de volume total et des volumes à diamètre et longueur variables des grumes d'arbres individuels du pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.) en Tunisie

Iheb ESSOUSSI<sup>1</sup>  
Tahar SGHAIER<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut National de Recherches en  
Génie Rural, Eaux et Forêts (INRGREF)  
Rue Hédi EL Karray El Menzah IV  
BP 10 2080 Ariana  
Tunisie

**Auteur correspondant /**  
**Corresponding author:**  
Tahar SGHAIER –  
[sghaiertahar@iresa.agrinet.tn](mailto:sghaiertahar@iresa.agrinet.tn)

**Photo 1.**  
Arbre de pin maritime,  
*Pinus pinaster*, coupé  
dans une placette  
de mesure et débité en  
billons de 0,50 m  
de longueur pour  
le cubage du bois fort  
de la tige principale.  
*Maritime pine (Pinus  
pinaster) tree cut in a  
measurement plot and  
cut into 0.50 m long  
logs for cubing the  
large timber of  
the main stem.*  
Photo : I. Essoussi.



**Doi :** 10.19182/bft2024.359.a37165 – Droit d'auteur © 2024, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 29 mai 2023 ;  
date d'acceptation : 17 octobre 2023 ; date de publication : 29 février 2024.



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

## Citer l'article / To cite the article

Essoussi I., Sghaier T., 2024. Développement des équations de volume total et des volumes à diamètre et longueur variables des grumes d'arbres individuels du pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.) en Tunisie. Bois et Forêts des Tropiques, 359 : 5-25. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2024.359.a37165>

## RÉSUMÉ

### Développement des équations de volume total et des volumes à diamètre et longueur variables des grumes et longueur variables des grumes d'arbres individuels du pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.) en Tunisie

Des tarifs de cubage globaux et marchands ont été développés pour le pin maritime (*Pinus pinaster*) en Tunisie. Les données utilisées proviennent de 90 arbres échantillonnés dans la forêt artificielle de pin maritime localisée dans les régions du Nord et du Nord-Ouest du pays. La technique d'ajustement adoptée est celle de régression non-linéaire sans corrélation apparente (NSUR : *Nonlinear Seemingly Unrelated Regression equations*), basée sur les moindres carrés généralisés. Pour corriger l'autocorrélation observée entre les erreurs successives issues des observations en provenance d'une même tige, un processus autorégressif d'ordre 3 sur ces erreurs a été incorporé dans le modèle d'ajustement des paramètres des différentes équations étudiées. Les tarifs de cubage développés permettent de prédire avec un coefficient de corrélation  $R^2$  ajusté variant de 97 à 99 % : (i) le volume total du bois fort des grumes jusqu'à une découpe quelconque, (ii) le volume entre deux niveaux de la grume, et (iii) le diamètre à une hauteur donnée ainsi que la hauteur à un diamètre de découpe donné de la grume. Grâce à ces tarifs, des tables de cubage d'estimation des volumes globaux et marchands des grumes d'arbres individuels de pin maritime ont été générées. Les équations de volume élaborées dans le cadre de cette étude représentent des outils flexibles, précis et pratiques pour la gestion adéquate des forêts de pin maritime en Tunisie et dans le bassin méditerranéen.

**Mots-clés :** *Pinus pinaster*, pin maritime, tarifs globaux, tarifs marchands, régression, Tunisie.

## ABSTRACT

### Development of equations of total volume and volumes of logs with variable diameter and length for individual maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) tree in Tunisia

Equations for total and commercial volumes were developed for maritime pine (*Pinus pinaster*) in Tunisia. The data used are from 90 sampled trees in *P. pinaster* forest plantations located in the north and north-west of the country. Nonlinear Seemingly Unrelated Regression (NSUR), based on the generalized least squares method, was used to fit the system of volume table equations. To take the inherent autocorrelation of the longitudinal data into account, a third-order continuous-time autoregressive error structure was used, which allows equations to be applied to irregularly spaced, unbalanced data. With an adjusted  $R^2$  determination coefficient ranging from 97 to 99%, the fitted volume equations can estimate: (i) the volume of the stem (large timber) before a specified cut, (ii) the volume between two levels of the stem, and (iii) the diameter at a given height as well as the height at a given diameter of the stem. Thanks to these equations, volume tables were generated to estimate total and commercial stem volumes for individual trees of *P. pinaster*. The volume equations developed through this study offer precise, practical, and flexible tools for efficient management of the *P. pinaster* forests in the Tunisian and Mediterranean basin contexts.

**Keywords:** *Pinus pinaster*, total volume equations, commercial volume equations, regression, Tunisia.

## RESUMEN

### Desarrollo de las ecuaciones de volumen total y de volúmenes con diámetro y longitud variables de los troncos de árboles individuales de pino marítimo (*Pinus pinaster* Ait.) en Túnez

Se han calculado tablas volumétricas globales y comerciales para el pino marítimo (*Pinus pinaster*) en Túnez. Los datos utilizados proceden de 90 árboles muestreados en el bosque artificial de pino marítimo situado en las regiones del norte y noroeste del país. Se adoptó como técnica de ajuste la regresión no lineal sin correlación aparente (NSUR: *Nonlinear Seemingly Unrelated Regression equations*), basada en los mínimos cuadrados generalizados. Para corregir la autocorrelación observada entre los errores sucesivos provenientes de las observaciones realizadas en un mismo tallo, se incorporó un proceso autorregresivo de tercer orden sobre estos errores al modelo de ajuste de los parámetros de las diferentes ecuaciones estudiadas. Las tablas volumétricas desarrolladas permiten predecir con un coeficiente de correlación  $R^2$  ajustado que varía del 97 al 99 %: (i) el volumen total de madera dura de los troncos hasta un corte especificado; (ii) el volumen entre dos niveles del tronco, y (iii) el diámetro a una altura determinada, así como la altura a un diámetro de corte determinado del tronco. Mediante estas tablas, se generaron las tablas para estimar los volúmenes globales y comerciales de los troncos de árboles individuales de pino marítimo. Las ecuaciones de volumen elaboradas en el marco de este estudio representan herramientas flexibles, precisas y prácticas para la gestión adecuada de los bosques de pino marítimo en Túnez y en la Cuenca del Mediterráneo.

**Palabras clave:** *Pinus pinaster*, pino marítimo, tablas globales, tablas comerciales, regresión, Túnez.



## Introduction

Les équations de volume, appelées encore tarifs de cubage, sont devenues des outils indispensables d'aide à la décision dans le domaine de gestion et d'aménagement des peuplements forestiers. Ce sont des outils de prédiction indirecte du volume total (V) du bois fort (BF) d'un arbre qui recourent à des variables disponibles et faciles à mesurer. Parmi les variables les plus utilisées, on peut citer le diamètre du tronc à hauteur de poitrine (DHP) ou à 1,30 m de hauteur et la hauteur totale (H) de l'arbre (Rondeux, 1993).

Les tarifs de cubage classiques peuvent être groupés en deux catégories. On trouve, d'une part, les tarifs dits à une entrée qui permettent de prédire le volume d'un arbre en tenant compte uniquement de son DHP et, d'autre part, les tarifs à deux entrées qui expriment le volume du même arbre en tenant compte du DHP et de H (Bouchon, 1974). Bien que plus simples et plus rapides à ajuster et utiliser, les tarifs à une entrée sont moins précis que les tarifs à deux entrées. L'un des points faibles des tarifs de cubage à une entrée est que la relation entre le DHP et la hauteur d'un arbre dépend fortement de l'âge, ce qui limite leur utilisation (Pardé et Bouchon, 1988). Même pour des arbres d'âges identiques, la relation entre le DHP et la hauteur peut varier selon les caractéristiques et le système de conduite des peuplements forestiers.

Comme en régression, la précision des tarifs de cubage dépend entre autres du nombre de variables indépendantes ou exogènes utilisées dans cette régression. De ce fait, la précision d'un tarif de cubage peut être améliorée en considérant plus de variables dendrométriques pour l'estimation du volume d'un arbre. Ainsi, des tarifs à trois variables peuvent être ajustés, quoique sur le plan pratique, leur utilisation ne soit pas recommandée car ils demandent des mesures supplémentaires plus coûteuses et plus difficiles à réaliser (Rondeux, 1993). En plus du DHP et de la hauteur, on peut par exemple utiliser une troisième variable dendrométrique telle que la hauteur à un diamètre donné ou le diamètre à une hauteur donnée.

D'autres types de tarifs de cubage, moins connus, peuvent également être développés, tels les tarifs paramétrés. En plus des variables dendrométriques habituelles utilisées dans le cas des tarifs classiques, les tarifs paramétrés utilisent une variable supplémentaire qui décrit certaines caractéristiques moyennes du peuplement, tel le rapport de la hauteur sur le DHP des arbres dominants. D'après Prigent *et al.* (2001), les tarifs paramétrés permettent d'avoir un aperçu de la forme de la tige à cuber tout en minimisant les coûts de la prise de mesures.

Les tarifs de cubage, dits tarifs classiques ou tarifs globaux, permettent en général d'estimer le volume BF d'un arbre de la souche jusqu'à une certaine découpe ou diamètre fin-bout de la tige. En Tunisie, le volume marchand BF d'un arbre est généralement calculé de 0,20 m du sol jusqu'à une découpe de 7 cm de diamètre fin-bout (Sghaier et Ammari, 2022). Des tarifs de cubage globaux ont été développés pour quelques espèces résineuses en Tunisie et ont concerné principalement le pin d'Alep (*Pinus hale-*

*pensis*) (Sghaier *et al.*, 2008), le pin pignon (*Pinus pinea* L.) (Sghaier *et al.*, 2013) et le thuya (*Thuja* sp.) (Calama *et al.*, 2012).

Étant donné que l'utilisation des tarifs de cubage globaux est souvent limitée aux estimations par les gestionnaires forestiers des volumes totaux des arbres dans le cadre des programmes d'aménagement et/ou d'exploitation des peuplements forestiers, d'autres types de tarifs de cubage dits tarifs commerciaux ou marchands ont été développés pour satisfaire des exigences de l'industrie du bois (Sghaier et Ammari, 2022). Ce sont des tarifs de cubage plus flexibles basés sur l'utilisation des fonctions de rapport de volumes et qui permettent de prédire le volume de bois jusqu'à des découpes prédéterminées (Sghaier et Ammari, 2022 ; Prigent *et al.*, 2001 ; Thibaut *et al.*, 1998 ; Fonweban et Houiller, 1997). À ce sujet, plusieurs fonctions permettant d'exprimer le rapport de volumes jusqu'à une découpe voulue (diamètre : d ou hauteur : h) à partir du volume total (V) de la tige, de ses dimensions (diamètre : D ou hauteur : H) et de la dimension à la découpe fixée (d ou h) ont été développées pour le pin à torches (*Pinus taeda*) au sud des États-Unis (Bullock et Burkhart, 2003 ; Cao et Burkhart, 1980 ; Burkhart, 1977) et utilisées récemment par Sghaier et Ammari (2022) pour le chêne zéen (*Quercus canariensis*) en Tunisie.

La combinaison des équations des rapports de volumes avec celle relative à l'estimation du volume total (V) de la tige d'un arbre, permet de calculer le volume de billons de longueur et de diamètre variables (volume de la tige jusqu'à la découpe de diamètre d,  $V_d = f(D, H, d)$ , ou volume de la tige jusqu'à la découpe de hauteur h,  $V_h = f(D, H, h)$ ), ou de décomposer le volume de la tige en assortiments de produits (Fonweban et Houiller, 1997). Il est également possible de générer des équations de défilement de la tige à partir des équations des rapports de volumes en considérant l'égalité de ces deux rapports pour un niveau de coupe fixé (d et h connus). Ces dernières permettent de prédire le diamètre fin-bout pour une hauteur donnée de la tige,  $d = f(D, H, h)$ , et inversement la hauteur ou la longueur de la tige pour un diamètre fin-bout donné,  $h = f(D, H, d)$ . Le champ d'application des fonctions de défilement est vaste, et l'on peut citer l'exemple d'estimation de certains produits (poteaux, bois de mines, etc.) dont les spécifications sont exprimées en termes de dimensions et non en termes de volumes (Fonweban et Houiller, 1997). Pour augmenter la précision des tarifs globaux et ceux à longueur et diamètre variables, le tarif global à deux entrées a été ajusté en premier lieu, puis, les valeurs des paramètres de ce dernier ont été utilisées comme fixes lors de l'ajustement des autres paramètres du système d'équations de défilement.

Cette étude visait à élaborer des tarifs de cubage globaux et des tarifs marchands pour le pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.) en Tunisie. Les données utilisées dans cette étude proviennent de 79 placettes temporaires de mesures réparties sur l'ensemble des plantations du pin maritime au nord et au nord-ouest du pays. Ces tarifs serviront comme

outils indispensables pour les gestionnaires forestiers pour optimiser les plans d'aménagement et de gestion soutenable des différents peuplements de cette espèce en Tunisie en particulier et dans les pays voisins de la rive sud de la Méditerranée en général.

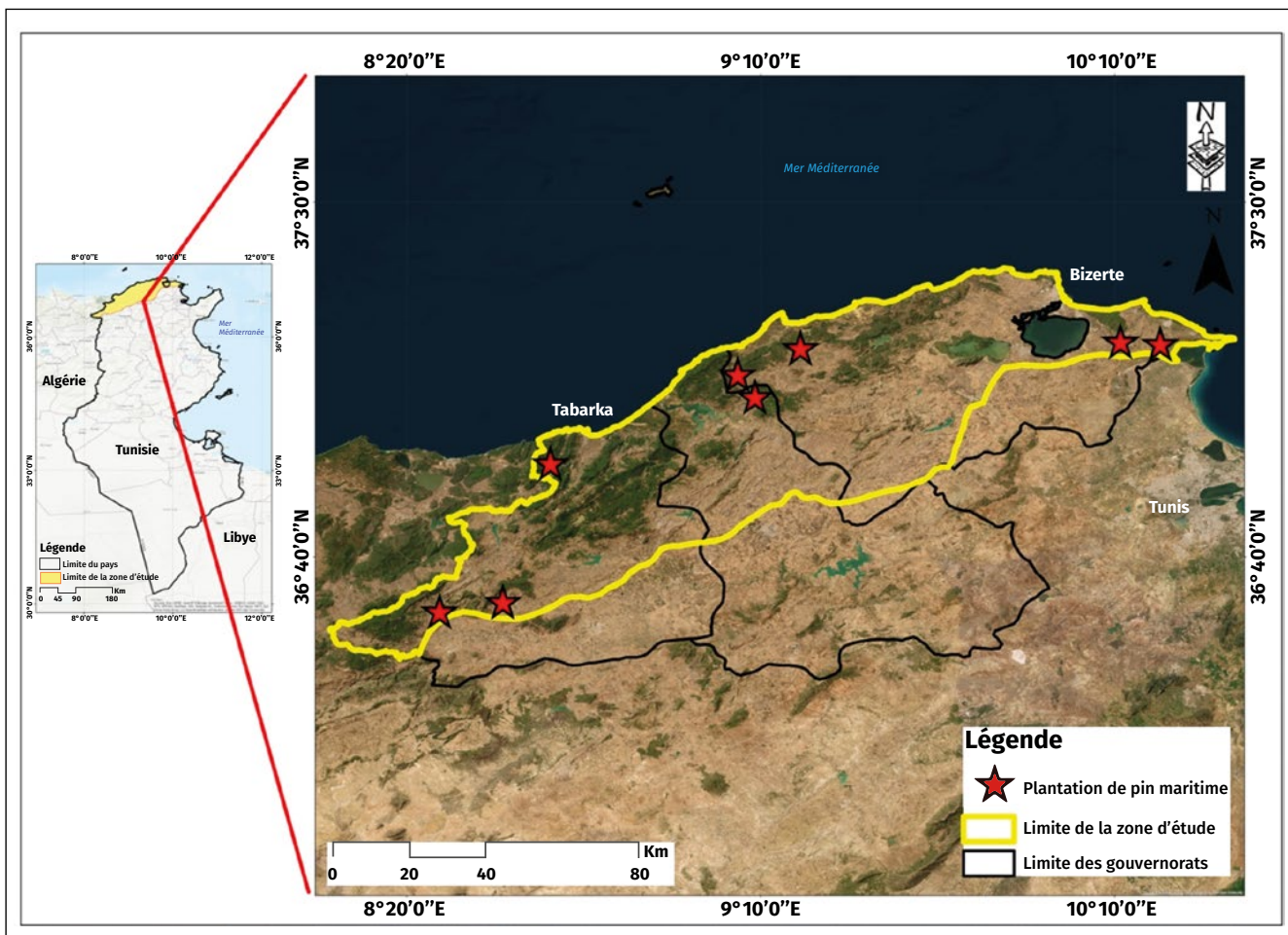
## Matériel et méthodes

### Les forêts de pin maritime en Tunisie

Le pin maritime (*P. pinaster* Ait.) est un conifère de la famille des Pinaceae qui peut atteindre 30 m de hauteur et un diamètre de 1,2 m (Alia et Martin, 2011). Il arrive à maturité vers 40-50 ans, et peut vivre jusqu'à 500 ans (Pépinières de l'Atlantique, 2023). Il s'agit d'une essence forestière originaire du bassin méditerranéen (Tunisie, Maroc, Algérie) qui pousse naturellement dans les zones bioclimatiques subhumides et humides fraîches, avec des hivers doux à chauds et des températures douces tout au long de l'année. Le pin maritime exige des précipitations annuelles de l'ordre de 800 à 1 000 mm et tolère les températures supérieures à 40 °C pendant une longue période, mais supporte mal les froids très rigoureux et durables (Pépinières de l'Atlantique, 2023).

D'après les résultats du premier inventaire forestier national en Tunisie (DGF, 1995), le pin maritime se trouve essentiellement dans la zone littorale du nord et nord-ouest du pays (figure 1) et couvre environ 3 811 ha incluant des forêts naturelles et artificielles. Il occupe à l'état spontané une petite zone (1 185 ha) située entre Tabarka et la frontière algérienne. Les surfaces actuellement couvertes de pin maritime, en dehors de son aire naturelle, sont localisées dans les gouvernorats de Bizerte (1 248 ha), Béja (678 ha) et Jendouba (700 ha). Il a été introduit depuis le début du vingtième siècle, sur les zones côtières de Tabarka, puis à partir des années 1950 comme espèce pour la fixation des dunes littorales de Kroumirie et des Mogods (Shaiek *et al.*, 2010).

La zone d'étude où l'on trouve le pin maritime sous forme de peuplements issus de reboisements est située au nord et nord-ouest de la Tunisie, couvrant les trois gouvernorats (Beja, Jendouba et Bizerte). C'est une zone forestière montagneuse avec des niveaux altitudinaux très contrastés. Les zones forestières les plus élevées se situent du côté de la frontière tuniso-algérienne et peuvent atteindre 1 200 m d'altitude. La partie centrale de la Kroumirie constitue la région des altitudes moyennes tandis que les zones les moins hautes, situées à seulement quelques mètres du niveau de la mer, se trouvent sur les dunes littorales tout le long des côtes nord de Tabarka à Bizerte (Selmi, 1985).



**Figure 1.**

Carte de répartition géographique des peuplements artificiels de pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.) en Tunisie.  
Geographical distribution map of artificial stands of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Tunisia.

### Données collectées

Les données de cubage utilisées pour l'ajustement des différents tarifs proviennent de 79 placettes temporaires de forme circulaire et de rayon variable (8,7 à 25 m), comportant chacune 40 tiges avec un DHP > 7 cm. Ces placettes d'échantillonnage sont réparties de façon à couvrir la diversité des milieux biogéographiques dans lesquels le pin maritime existe sous forme de plantations dont l'âge varie de 43 à 69 ans. L'arbre dominant de chaque placette a été coupé au niveau de la souche (0,30 m) puis sa grume a été tronçonnée en billons de 0,50 m de longueur jusqu'à la découpe marchande de 7 cm de diamètre. En outre, le diamètre de l'extrémité supérieure de chaque billon a été mesuré pour calculer le volume des différents billons de la grume (tige principale) en utilisant la méthode des billons successifs (Rondeux, 1993). Le volume total bois fort de chaque grume est égal à la somme du volume de ses billons.

Comme le premier échantillon ne renferme que les arbres dominants des placettes de mesure dont le DHP a varié de 18 à 61 cm et afin de tenir compte de toutes les classes de diamètre disponibles dans l'ensemble des 79 placettes de mesure, un échantillon complémentaire de 11 arbres avec un DHP variant de 13 à 23 cm a été sélectionné dans les mêmes placettes de mesure. Les 11 arbres complémentaires ont été également coupés, tronçonnés en billons de 0,50 m de longueur et cubés. La figure 2 présente la projection, en fonction du DHP, du volume BF et de la hauteur totale des 79 arbres dominants de chaque placette et ceux des 11 arbres complémentaires choisis dans les mêmes placettes de mesure.

### Tarifs de cubage globaux

Les tarifs de cubages totaux correspondent aux tarifs bois fort (BF) des grumes (tige principale). Deux tarifs de cubage à une et à deux entrées ont été ajustés pour prédire le volume BF des grumes de pin maritime.

Pour élaborer des tarifs de cubage totaux qui permettent de prédire le volume bois fort d'un arbre  $i$  ou celui de sa grume (tige principale) pour le pin maritime en Tunisie, nous avons ajusté et testé un total de neuf équations couramment utilisées dans la littérature. Il s'agit des équations suivantes :

$$V_i = a_0 + a_1 D_i + a_2 D_i^2 + \varepsilon_i \quad (\text{Eq.1})$$

$$V_i = a_0 + a_1 D_i + a_2 D_i^2 + a_3 D_i^3 + \varepsilon_i \quad (\text{Eq.2})$$

$$V_i = a_0 D_i^{a_1} + \varepsilon_i \quad (\text{Eq.3})$$

$$V_i = a_0 + a_1 D_i + a_2 D_i^2 + a_3 D_i^2 H_i + \varepsilon_i \quad (\text{Eq.4})$$

$$V_i = a_0 + a_1 D_i + a_2 D_i^2 + a_3 D_i^3 + a_4 D_i^2 H_i + \varepsilon_i \quad (\text{Eq.5})$$

$$V_i = a_0 + a_1 D_i + a_2 D_i^2 + a_3 D_i^3 + a_4 H_i + a_5 D_i^2 H_i + \varepsilon_i \quad (\text{Eq.6})$$

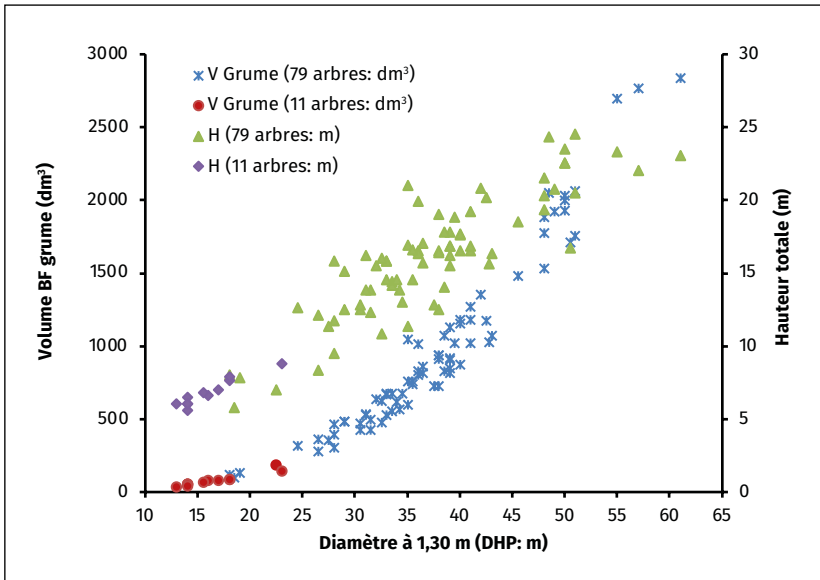
$$V_i = a_0 D_i^{a_1} H_i^{a_2} + \varepsilon_i \quad (\text{Eq.7})$$

$$V_i = D_i^{(a_0 + a_1 H_i)} + \varepsilon_i \quad (\text{Eq.8})$$

$$V_i = a_0 D_i^{a_1} e^{(a_2 H_i)} + \varepsilon_i \quad (\text{Eq.9})$$

Dans ces équations,  $V_i$  représente le volume BF de la grume de l'arbre  $i$  ( $\text{dm}^3$ ),  $D_i$  et  $H_i$  sont respectivement le DHP (en cm) et la hauteur  $H$  (en m) de l'arbre  $i$  et  $\varepsilon_i$  est un résidu, variable aléatoire de moyenne nulle et de variance  $\sigma^2$ .

Ces équations ou tarifs peuvent être groupés en deux catégories distinctes, les tarifs à une entrée (Eq.1 à Eq.3) qui expriment le volume en fonction d'une seule caractéristique de l'arbre (DHP), et les tarifs à deux entrées (Eq.4 à Eq.9) qui expriment le volume en fonction de deux caractéristiques de l'arbre (DHP et  $H$ ). Les équations Eq.1 à Eq.7 sont des fonctions classiquement utilisées pour l'élaboration des tarifs de cubage d'arbres individuels (Thill et Palm, 1979 ; Palm, 1981 ; Sghaier *et al.*, 2008, 2013 ; Sghaier et Ammari, 2022). Les deux fonctions Eq.8 et Eq.9 ont été testées par Tomé *et al.* (2005) pour la modélisation de la biomasse aérienne des arbres individuels de châtaignier commun (*Castanea sativa* Mill.) dans le nord-ouest du Portugal, puis par Sghaier et Ben Abdallah (2022) pour la modélisation de la biomasse aérienne des arbres individuels de jeunes peuplements de pin pignon et du pin maritime en Tunisie. Les fonctions Eq.8 et Eq.9 ont été également testées pour le cubage du



**Figure 2.** Projection du volume bois fort (BF) et de la hauteur totale des 79 arbres dominants de pin maritime (*Pinus pinaster*) de chaque placette, et ceux des 11 arbres complémentaires en fonction de leur diamètre à hauteur de poitrine (DHP).  
 Projection of the large timber volume (BF) and total height of the 79 dominant maritime pine (*Pinus pinaster*) trees in each plot, and those of the 11 additional trees according to their diameter at breast height (DHP).

pin d'Alep dans les Aurès algériens par Goubi *et al.* (2019) et pour le cubage de chêne zéen dans le nord-ouest de la Tunisie par Sghaier et Ammari (2022).

Un autre problème commun inhérent à la construction des équations de volume est l'hétérogénéité élevée de la variance des erreurs qui augmente avec la dimension des arbres cubés (Rondeux, 1993 ; Barrio Anta *et al.*, 2007). Dans ces équations, il est souvent supposé que la variance de l'erreur ( $\sigma_i^2$ ) peut être exprimée comme une fonction puissance de la variable  $D^2$  ou  $D^2H$  (Furnival, 1961 ; Cailliez, 1980) :  $\sigma_i^2 = (D_i^2)^m$ . La valeur du paramètre  $m$  peut être calculée par la méthode suggérée par Harvey (1976, cité par Parresol, 1993) qui consiste à employer les erreurs obtenues par l'équation de cubage ( $\hat{\epsilon}_i^2$ ), en tant que variable dépendante dans la modélisation de la variance de l'erreur :  $\hat{\epsilon}_i^2 = \gamma (D_i^2)^m$ . L'homoscédasticité des résidus n'étant pas respectée, la fonction suivante de pondération des erreurs (Barrio Anta *et al.*, 2007) a été incorporée dans la procédure d'ajustement des paramètres de chacune des neuf équations étudiées (Eq.1 – Eq.9) :

$$\hat{\epsilon}_i = \hat{\epsilon}_i / \sqrt{(D_i^2)^m}$$

L'ajustement des différentes équations de cubage ainsi que celui de pondération des erreurs a été effectué à l'aide de la procédure MODEL du module SAS/ETS (SAS, 2004) où le volume  $V$  est la variable dépendante du modèle.

### Rapports de volumes

Étant donné la faible longueur des billons (0,5 m) issus des analyses de tiges, ces derniers ont été assimilés à un cylindre dont la base et la hauteur correspondent respectivement au diamètre moyen (moyenne des dia-

mètres des deux bouts du billon) et à la longueur du billon. Le volume total de la grume est la somme des volumes de ses différents billons. La figure 3 décrit la codification et la désignation des variables dendrométriques associées aux tarifs de cubage des volumes marchands (tarifs à diamètre et longueur variables) de la grume d'un arbre.

Les 90 arbres échantillonnés ont donné naissance à 2 310 billons. Pour chaque arbre cubé, le volume total ( $V_i$ ) de la grume de l'arbre  $i$  et les volumes cumulés  $vd_{ij}$  et  $vh_{ij}$  pour chaque découpe ( $j$ ) de la même grume ont été calculés. Par la suite, les rapports  $Rvd_{ij}$  et  $Rvh_{ij}$  correspondant aux rapports des volumes cumulés  $vd_{ij}$  et  $vh_{ij}$  par rapport au volume total ( $V_i$ ) de la grume ( $i$ ) aux différentes découpes ( $j$ ) ont été déterminés.

Les équations des rapports de volumes pour un arbre ( $i$ ) aux différentes découpes ( $j$ ) ont les formes suivantes :

$$Rvd_{ij} = \frac{vd_{ij}}{V_i} = f(d_{ij}, D_i) \quad \text{et} \quad Rvh_{ij} = \frac{vh_{ij}}{V_i} = f(h_{ij}, H_i)$$

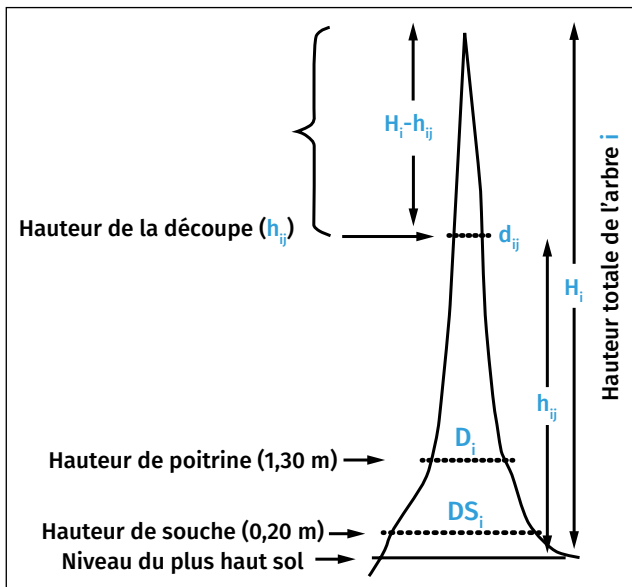
Pour choisir les fonctions qui permettent de mieux prédire les deux rapports de volumes  $Rvd$  et  $Rvh$  des grumes des arbres de pin maritime en Tunisie, trois fonctions relatives au rapport  $Rvd$  (Eq.10, Eq.11 et Eq.12) et trois autres fonctions relatives au rapport  $Rvh$  (Eq.13, Eq.14 et Eq.15) ont été ajustées et comparées. Les trois premières fonctions Eq.10, Eq.11 et Eq.12 expriment le rapport de volume ( $Rvd_{ij}$ ) de la grume d'un arbre  $i$  jusqu'à un diamètre  $j$  en fonction de  $D_i$  (DHP) et de  $d_{ij}$ . Les trois autres fonctions Eq.13, Eq.14 et Eq.15 expriment le rapport de volume ( $Rvh_{ij}$ ) de la grume d'un arbre  $i$  jusqu'à une hauteur  $j$  en fonction de la hauteur totale de l'arbre  $H_i$  et de  $h_{ij}$ . Les fonctions Eq.10 et Eq.14 ont été utilisées par Fonweban et Houllier (1997) pour *Eucalyptus saligna* au Cameroun, puis par Prégent *et al.*, (2001) pour le pin gris (*P. banksiana* Lamb.) au Québec. La fonction Eq.11 a été développée par Van Deusen *et al.* (1981) pour le pin à l'encens ou à torches (*P. taeda*) au sud des États-Unis, puis modifiée par Tasissa *et al.* (1997) pour la même espèce. La fonction Eq.12 a été développée par Burkhart (1977) pour le pin à torches dans le Sud des États-Unis. Finalement la fonction Eq.13 a été développée par Cao et Burkhart (1980) et la fonction Eq.15 par Bullock et Burkhart (2003), toujours pour le pin à torches au sud des États-Unis. Plus récemment, Sghaier et Ammari (2022) ont utilisé les équations Eq.11 et Eq.15 pour le chêne zéen en Tunisie.

Il est facile de vérifier que lorsque  $d_{ij} = 0$  ou  $h_{ij} = H_i$ , c'est-à-dire lorsqu'on considère l'arbre entier, les rapports de volumes (Eq.10 à Eq.15) seront égaux à l'unité et les volumes cumulés  $vd_{ij}$  et  $vh_{ij}$  seront égaux au volume total  $V_i$  :

$$Rvd_{ij} = 1 + b_0 \left( \frac{d_{ij}}{D_i} \right)^{b_1} + \epsilon_{ij} \quad (\text{Eq.10})$$

$$Rvd_{ij} = \exp \left( \frac{b_0 d_{ij}^{b_1}}{D_i^{b_2}} \right) + \epsilon_{ij} \quad (\text{Eq.11})$$

$$Rvd_{ij} = 1 + b_0 \left( \frac{d_{ij}}{D_i} \right)^{b_1} + \epsilon_{ij} \quad (\text{Eq.12})$$



**Figure 3.**

Schéma d'une tige  $i$  et désignation des variables associées aux tarifs de cubage des volumes marchands aux différentes découpes  $j$ .

Diagram of a stem  $i$  and designation of the variables associated with the cubage rates of the merchantable volumes at the different cuts  $j$ .

$$Rvh_{ij} = 1 + b_0 \left( \frac{(H_i - h_{ij})^{b_1}}{H_i^{b_2}} \right) + \varepsilon_{ij} \quad (\text{Eq.13})$$

$$Rvh_{ij} = 1 + b_0 \left( \frac{H_i - h_{ij}}{H_i} \right)^{b_1} + \varepsilon_{ij} \quad (\text{Eq.14})$$

$$Rvh_{ij} = \exp \left( \frac{b_0 (H_i - h_{ij})^{b_1}}{H_i^{b_2}} \right) + \varepsilon_{ij} \quad (\text{Eq.15})$$

Les fonctions Eq.10 à Eq.15 ont été ajustées en considérant les rapports des volumes calculés à partir des volumes cumulés par pas de 0,5 m sur toute la longueur de la grume jusqu'au diamètre fin-bout de 7 cm, divisés par le volume total de la grume. Comme les grumes des arbres ont été cubées par billons successifs de faible longueur fixe (0,5 m) jusqu'à la découpe fin-bout de 7 cm de diamètre, les diamètres début (à la base) et fin ( $d_{i1}$  et  $d_{i2}$ ) de chaque billon peuvent être les mêmes pour quelques billons successifs. Partant du principe que le diamètre du tronc diminue en fonction de la hauteur de l'arbre, et pour pouvoir appliquer les fonctions des rapports de volumes, la longueur et le volume des billons successifs dont les deux diamètres début et fin sont égaux ( $d_{i2} = d_{i1}$ ) ont été cumulés de manière à obtenir des billons de longueurs variables avec des diamètres  $d_{i2}$  toujours inférieurs à  $d_{i1}$  (Sghaier et Ammari, 2022).

Pour résoudre le problème d'autocorrélation qui existe entre les résidus successifs d'une même grume à cause des mesures répétées sur le même arbre et augmenter la précision des estimations des paramètres des fonctions ajustées (Eq.10 à Eq.15), un processus autorégressif sur les erreurs issues des observations en provenance d'un même arbre a été incorporé dans le modèle d'ajustement des paramètres de ces fonctions (Diéguez-Aranda *et al.*, 2006). Il s'agit de la fonction « structure autorégressive d'erreurs successives » CAR(x) donnée par l'expression :

$$\hat{\varepsilon}_{ij} = \sum_{n=1}^x d_n \rho_n^{h_{ij} - h_{i(j-n)}} \hat{\varepsilon}_{i(j-n)} + \varepsilon_{ij}$$

où :

- $\hat{\varepsilon}_{ij}$  est la différence entre le rapport de volume observé et celui estimé de l'arbre  $i$  jusqu'à la découpe  $j$  ;
- $d_n$  est une variable « binaire » qui prend la valeur 1 si les mesures correspondent à des découpes différentes pour un même arbre et 0 sinon ;
- $\rho_n$  est le paramètre du  $n^{\text{ième}}$  ordre autorégressif à estimer ;
- $h_{ij} - h_{i(j-n)}$  est la longueur du billon (en m) qui sépare la  $j^{\text{ème}}$  de la  $j^{\text{ème}} - n$  découpe de l'arbre  $i$ .

Pour corriger l'autocorrélation des résidus et déterminer l'ordre de la fonction CAR(x) à utiliser, des graphiques présentant les résidus de la variable explicative contre Lag-résidus de l'observation précédente de chaque arbre ont été examinés. Les trois premiers ordres ont été examinés graphiquement avec les Lag-résidus et le troisième ordre CAR(3), qui a permis un contrôle total de l'autocorrélation entre les résidus successifs d'un même arbre, a été choisi.

### Critères de comparaison des fonctions ajustées

La comparaison des capacités d'ajustement et de prédiction des différentes équations ajustées (tarifs de cubage globaux et rapports de volumes) a été basée sur des analyses numériques et graphiques des résidus issus de ces fonctions.

#### Capacité d'ajustement :

- Coefficient de détermination ajusté  $R_{aj}^2$  : il représente la part de variabilité de la variable dépendante qui est expliquée par la régression. Contrairement au coefficient de détermination ordinaire  $R^2$ , le coefficient de détermination ajusté tient compte du nombre de paramètres ( $p$ ) dans le modèle, et il est utilisé pour comparer des modèles présentant un nombre différent de paramètres. Il est donné par la formule suivante (Palm, 1988 ; Sghaier *et al.*, 2008) :

$$R_{aj}^2 = 1 - \frac{(n-1) \sum_{i=1}^n (V_i - \hat{V}_i)^2}{(n-p) \sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2}$$

$V_i$  et  $\hat{V}_i$  désignent le volume observé et celui estimé de l'arbre  $i$ , et  $\bar{V}$  est le volume moyen de tous les arbres cubés.

- Biais : le biais est la moyenne des résidus et se calcule comme suit :

$$\text{Biais} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_i - \hat{V}_i)$$

Plus le biais est faible (proche de 0), meilleur est l'ajustement.

- Moyenne quadratique des résidus absolus ( $S_a$ ) : elle donne l'ordre de grandeur de l'écart absolu existant en moyenne entre le volume observé et le volume estimé ( $n$  étant le nombre d'observations). Elle est essentiellement fonction des erreurs commises sur les gros arbres.

$$S_a = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_i - \hat{V}_i)^2}$$

- Moyenne quadratique des résidus relatifs ( $S_r$ ) : elle est liée davantage aux erreurs commises sur les petits arbres.

$$S_r = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{V_i - \hat{V}_i}{\hat{V}_i} \right)^2}$$

L'ajustement est d'autant meilleur que les valeurs de ces deux paramètres sont faibles (Palm, 1981 ; Rondeux, 1993).

- Normalité de la distribution des résidus : la normalité de la distribution des erreurs a été examinée à l'aide du test de normalité de Ryan-Joiner (Ryan et Joiner, 1976) et de la représentation graphique des quantiles normaux (*QQ-probability plots*).

- Indépendance des résidus : il s'agit d'un test qui permet de vérifier l'hypothèse d'indépendance des résidus lorsque ceux-ci sont classés selon un ordre logique, par exemple en fonction des valeurs croissantes ou décroissantes de la grosseur des tiges (Palm, 1986). Cette vérification peut se faire par le test de Durbin-Watson. La méthode consiste à calculer la quantité suivante :

$$DW = \frac{\sum_{i=2}^n (\hat{e}_i - \hat{e}_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n \hat{e}_i^2}$$

avec :  $\hat{e}_i = V_i - \hat{V}_i$ .

Cette caractéristique est comprise entre 0 et 4. Une valeur très inférieure à 2 indique une corrélation positive entre les résidus successifs, et une valeur très supérieure à 2 correspond à une corrélation négative entre ces résidus. Par contre, une valeur voisine de 2 ne permet pas de rejeter l'hypothèse d'indépendance des résidus. Des tables permettant de tester de façon rigoureuse l'hypothèse d'indépendance sont données notamment par Draper et Smith (1981).

Un test approché a été proposé par Von Neumann (Morice et Chartier, 1954). Ce test, basé sur le caractère asymptotiquement normal du quotient :

$$q = \frac{DW}{2}, \text{ consiste à comparer la valeur } Z_{obs} : Z_{obs} = \frac{|q-1|}{\sqrt{\frac{n-2}{n^2-1}}},$$

à la valeur théorique  $Z_{1-\alpha/2}$  (distribution normale réduite), et à rejeter l'hypothèse d'indépendance des résidus si la valeur  $Z_{obs}$  est supérieure ou égale à  $Z_{1-\alpha/2}$ , pour un degré de confiance de 95 %,  $Z_{1-\alpha/2} = 1,96$ .

### Capacité de prédiction :

La capacité de prédiction des différentes fonctions étudiées est basée sur le calcul des résidus PRESS (Prediction Sum of Squares) ou erreurs de prédiction. Ces résidus sont équivalents aux résidus obtenus en omettant chaque fois une observation de la liste des données, en ajustant les paramètres de l'équation avec les autres observations restantes, en estimant la réponse de l'observation omise et en comparant la valeur prédite avec celle observée :  $e_i = V_i - \hat{V}_{i,-i}$ , ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) où  $V_i$  est le volume observé,  $\hat{V}_{i,-i}$  est la valeur estimée de l'observation  $i$  (lorsque cette dernière est absente des données utilisées pour l'ajustement des paramètres de l'équation de régression) et  $n$  est le nombre d'observations. Chaque équation ou fonction possède dans ce cas  $n$  résidus PRESS et la quantité PRESS est définie comme suit (Sánchez-González et al., 2005, 2007 ; Sghaier et al., 2019, 2020) :

$$PRESS = \sum_{i=1}^n (V_i - \hat{V}_{i,-i})^2$$

Plus la valeur de PRESS est proche de la somme des carrés des écarts résiduels, meilleure est la capacité de prédiction de l'équation de régression en termes de précision. Les résidus PRESS ont été également utilisés pour calculer les critères de comparaison suivants :

- Biais de prédiction :  $Biais_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_i - \hat{V}_{i,-i})$
- Moyenne quadratique des résidus absolus de prédiction :

$$S_{ap} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_i - \hat{V}_{i,-i})^2}$$

- Moyenne quadratique des résidus relatifs de prédiction :

$$S_{rp} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{V_i - \hat{V}_{i,-i}}{\hat{V}_{i,-i}} \right)^2}$$

- Coefficient de détermination de prédiction (press R-square) :

$$R_{press}^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \hat{V}_{i,-i})^2}{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V}_i)^2}$$

Pour identifier les meilleures fonctions à retenir comme tarif de cubage des volumes totaux du bois fort des grumes, nous avons procédé en deux étapes :

- La première étape consistait à repérer les fonctions dont tous les paramètres (coefficients de régression) étaient significatifs et les hypothèses d'indépendance des résidus (résidus d'ajustement et résidus de prédiction) étaient vérifiées ( $Z_{obs} \leq 1,96$ );
- La seconde étape consistait à comparer les fonctions déjà retenues en se basant sur les autres critères d'évaluation relatifs aux capacités d'ajustement et de prédiction de ces fonctions ainsi que sur des représentations graphiques relatives à (i) la répartition des moyennes quadratiques des résidus absolus ( $S_a$ ) et des résidus relatifs ( $S_r$ ) par classe de diamètre, à (ii) l'homoscédasticité et à (iii) la normalité de la distribution des mêmes résidus.

L'application de cette approche de sélection des équations adéquates a permis de retenir les équations Eq.1, Eq.7, Eq.11 et Eq.15.

### Volumes variables et défilement

L'ajustement individuel des fonctions Eq.10 à Eq.15 relatives à la prédiction des rapports de volume  $Rvd_{ij}$  (rapport du volume jusqu'à un diamètre donné) et  $Rvh_{ij}$  (rapport de volume jusqu'à une hauteur donnée) de la grume a permis de retenir les fonctions Eq.11 (RMSE = 0,0300 ;  $R^2 = 0,9899$ ) pour le premier rapport et Eq.15 (RMSE = 0,0136 ;  $R^2 = 0,9976$ ) pour le deuxième.

Les tarifs de cubage marchands ou à diamètre et longueur variables des grumes des arbres résultent de la combinaison de la fonction retenue pour la prédiction du volume total à deux entrées  $V_i$  du bois fort des grumes (Eq.7) et de celles relatives à la prédiction des deux rapports du même volume cumulé à diamètre variable  $Rvd_{ij}$  (Eq.11) et à hauteur variable  $Rvh_{ij}$  (Eq.15). Ainsi, les deux fonctions des volumes cumulés  $vd_{ij}$  (volume cumulé de la grume jusqu'à un diamètre donné) et  $vh_{ij}$  (volume cumulé de la grume jusqu'à une hauteur donnée) sont les suivantes :

$$Rvd_{ij} = \frac{vd_{ij}}{V_i} \Rightarrow vd_{ij} = a_0 D_i^{a_1} H_i^{a_2} \times \exp\left(\frac{b_0 d_{ij}^{b_1}}{D_i^{b_2}}\right) + \varepsilon_{ij} \quad \text{Eq.16}$$

$$Rvh_{ij} = \frac{vh_{ij}}{V_i} \Rightarrow vh_{ij} = a_0 D_i^{a_1} H_i^{a_2} \times \exp\left(\frac{b_3 (H_i - h_{ij})^{b_4}}{b_i}\right) + \varepsilon_{ij} \quad \text{Eq.17}$$

Pour un niveau de coupe  $j$  donné de la grume d'un arbre  $i$ , caractérisé par un diamètre  $d_{ij}$  et une hauteur  $h_{ij}$ , les deux volumes cumulés  $vd_{ij}$  et  $vh_{ij}$  doivent être identiques. Ainsi, l'égalité des fonctions Eq.16 et Eq.17 permet de déterminer d'une part le diamètre  $d_{ij}$  de la grume  $i$  pour un niveau de coupe donné  $j$  en fonction de  $H_i$ ,  $D_i$  et  $h_{ij}$  et, d'autre part, de déterminer la hauteur  $h_{ij}$  de la grume au même niveau de coupe  $j$  en fonction de  $H_i$ ,  $D_i$  et  $d_{ij}$ . Les fonctions Eq.18 et Eq.19 expriment ces deux relations :

$$d_{ij} = (b_3/b_0)^{1/b_1} D_i^{b_2/b_1} \left( (H_i - h_{ij})^{b_4/b_1} / H_i^{b_5/b_1} \right) + \varepsilon_{ij} \quad (\text{Eq.18})$$

$$h_{ij} = H_i - (b_0/b_3)^{1/b_4} (H_i)^{b_5/b_4} \left( d_{ij}^{b_1/b_4} / D_i^{b_2/b_4} \right) + \varepsilon_{ij} \quad (\text{Eq.19})$$

Pour estimer les paramètres des fonctions Eq.16 à Eq.19, qui expriment les variables  $vd_{ij}$ ,  $vh_{ij}$ ,  $d_{ij}$  et  $h_{ij}$ , ces dernières ont été ajustées à l'aide du système d'équations simultanées S1 suivant :

$$S1: \begin{cases} d_{ij} = (b_3/b_0)^{1/b_1} D_i^{b_2/b_1} \left( (H_i - h_{ij})^{b_4/b_1} / H_i^{b_5/b_1} \right) + \varepsilon_{ij} & (\text{Eq.18}) \\ h_{ij} = H_i - (b_0/b_3)^{1/b_4} (H_i)^{b_5/b_4} \left( d_{ij}^{b_1/b_4} / D_i^{b_2/b_4} \right) + \varepsilon_{ij} & (\text{Eq.19}) \\ vd_{ij} = (a_0 D_i^{a_1} H_i^{a_2}) \times \exp(b_0 d_{ij}^{b_1} / D_i^{b_2}) + \varepsilon_{ij} & (\text{Eq.16}) \\ vh_{ij} = (a_0 D_i^{a_1} H_i^{a_2}) \times \exp(b_3 (H_i - h_{ij})^{b_4} / H_i^{b_5}) + \varepsilon_{ij} & (\text{Eq.17}) \end{cases}$$

Étant donné que les différentes équations du système S1 utilisent les mêmes variables indépendantes, les termes d'erreurs issues de ces équations sont dépendants (Sghaier et Ammari, 2022). Pour résoudre ce problème de dépendance entre les termes d'erreurs, la méthode d'ajustement qui a été utilisée est la régression non-linéaire sans corrélations apparentes (NSUR : *Nonlinear Seemingly Unrelated Regression equations*), basée sur les moindres carrés généralisés (Zheng et al., 2015). D'autre part et afin d'en-

lever les autocorrélations entre les résidus successifs issus des observations répétées réalisées sur un même arbre, un modèle autorégressif du troisième ordre CAR(3) sur les résidus de chaque équation du système a été incorporé dans la procédure d'ajustement. Finalement, pour avoir la même estimation du volume total BF de la grume par l'utilisation du tarif global (Eq.7) ou des tarifs à diamètre et longueur variables des volumes cumulés  $vd_{ij}$  et  $vh_{ij}$  (Eq.16 et Eq.17), les valeurs ajustées des paramètres  $a_0$ ,  $a_1$  et  $a_2$  ont été considérées comme fixes et égales à celles estimées pour la fonction Eq.7 dans le cas du volume de la grume (tableau IV). Dans ce cas, seuls les paramètres  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$  et  $b_5$  des équations du système S1 étaient à estimer.

## Résultats

### Tarifs de cubage des volumes totaux

Le tableau I présente la répartition des 90 arbres de pin maritime cubés par classes de DHP et par classes de hauteur totale. Les caractéristiques dendrométriques et les volumes des grumes des 90 tiges cubées figurent au tableau II.

Sur la base des valeurs des différents critères de comparaison des trois équations de cubage à une entrée (Eq.1 à Eq.3) et à deux entrées (Eq.4 à Eq.9), les équations Eq.1 et Eq.7 présentaient les meilleurs résultats d'ajustement et de prédiction par comparaison aux autres équations. Le tableau III présente les principaux résultats des ajustements de ces deux équations sans et avec l'incorporation d'une fonction de pondération des résidus en fonction du DHP.

**Tableau I.**

Répartition des 90 arbres de pin maritime (*Pinus pinaster*) coupés par classes de diamètre à hauteur de poitrine (DHP) et par classes de hauteur.  
*Distribution of the 90 maritime pine (Pinus pinaster) trees cut by diameter at breast height (DHP) and height classes.*

Classes de DHP (cm)	Centre de classes (cm) ↓ (m →)	Classes de hauteur totale (m)										Total	
		≤ 6	[6-8]	[8-10]	[10-12]	[12-14]	[14-16]	[16-18]	[18-20]	[20-22]	≥ 22		
≤ 17,5	15	3	5										8
]17,5-22,5]	20	1	5										6
]22,5-27,5]	25			2	1	2							5
]27,5-32,5]	30			1	2	6	4	1					14
]32,5-37,5]	35				1	3	8	5	1	1			19
]37,5-42,5]	40					2	1	12	3	2			20
]42,5-47,5]	45						1	1	1			1	4
]47,5-52,5]	50							1	1	4	5		11
> 52,5	55								1	1	1		3
<b>Total</b>	-	<b>4</b>	<b>10</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>20</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>7</b>		<b>90</b>

**Tableau II.**

Statistiques descriptives des variables dendrométriques mesurées des 90 arbres de pin maritime (*Pinus pinaster*) cubés. H : hauteur totale ; DHP : diamètre à hauteur de poitrine (1,30 m).

Descriptive statistics for dendrometric variables measured on 90 trees of maritime pine (*Pinus pinaster*) cubed. H: total height; DHP: diameter at breast height (1.30 m).

Variables	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
Hauteur totale (H en m)	5,60	24,50	14,89	4,84
Diamètre à 1,30 m (DHP en cm)	13,00	61,00	34,69	10,786
Volume des grumes (dm <sup>3</sup> )	32,420	2 830,610	852,273	647,185

Pour choisir entre les équations pondérées ou non pondérées à retenir comme tarifs globaux pour le cubage des grumes d'arbres de pin maritime en Tunisie, nous nous sommes basés sur les résultats des ajustements de ces équations (tableau III) et des représentations graphiques de quelques critères de comparaison calculés à partir des résidus (figures 4, 5 et 6). Du point de vue des valeurs des différents critères de comparaison utilisés, le tableau III montre que l'incorporation d'une fonction de pondération des résidus en fonction du DHP dans la procédure d'ajus-

tement des paramètres des équations retenues a permis une nette amélioration pour le tarif à deux entrées (Eq.7). La représentation graphique des moyennes quadratiques des résidus absolus ( $S_a$ ) et des moyennes quadratiques des résidus relatifs ( $S_r$ ) par classe de diamètre (figure 4), montre que la pondération améliore la qualité d'ajustement pour le tarif à une entrée (Eq.1) en ce qui concerne les erreurs commises essentiellement sur les gros arbres ( $S_r$ ). Sur le plan de la constance des erreurs ou homoscedasticité (figure 5) et de la normalité de la distribution (figure 6), la pondération semble avoir un effet positif, cela pour les deux tarifs à une (Eq.1) et à deux entrées (Eq.7). Ainsi, les tarifs globaux finalement retenus pour le cubage des grumes d'arbres de pin maritime en Tunisie sont ceux issus de l'ajustement des équations Eq.1 et Eq.7 avec pondération des résidus en fonction du DHP.

Les écritures mathématiques des deux équations retenues sont les suivantes :

- tarif à une entrée (Eq.1) :  

$$v = 227,681 - 30,996 \times D + 1,287 \times D^2$$
avec  $R_{aj}^2 = 0,9675$  et  $RMSE = 116,700 \text{ dm}^3$  ;
- tarif à deux entrées (Eq.7) :  

$$v = 5,158 \times 10^{-2} \times D^{2,146} H^{0,6986}$$
avec  $R_{aj}^2 = 0,9890$  et  $RMSE = 67,856 \text{ dm}^3$ .

**Tableau III.**

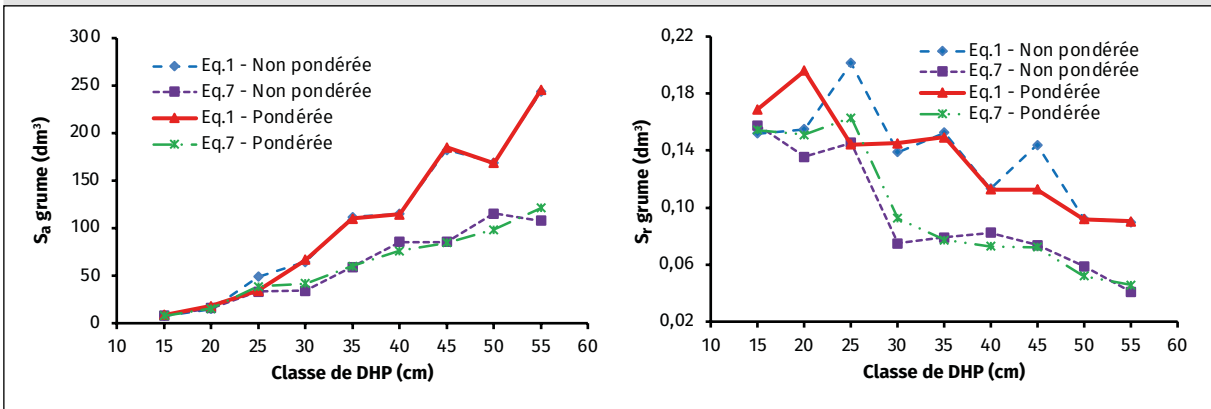
Valeurs estimées, test de signification des paramètres et précision des tarifs de cubage non pondérés et pondérés : tarif à une entrée (équation Eq.1) et tarif à deux entrées (équation Eq.7) des grumes d'arbres de pin maritime (*Pinus pinaster*) inventoriés en Tunisie.

Estimated values, significance test of parameters and precision of unweighted and weighted volume equations: single-entry rate (equation Eq.1) and double-entry rate (equation Eq.7) of maritime pine (*Pinus pinaster*) logs inventoried in Tunisia.

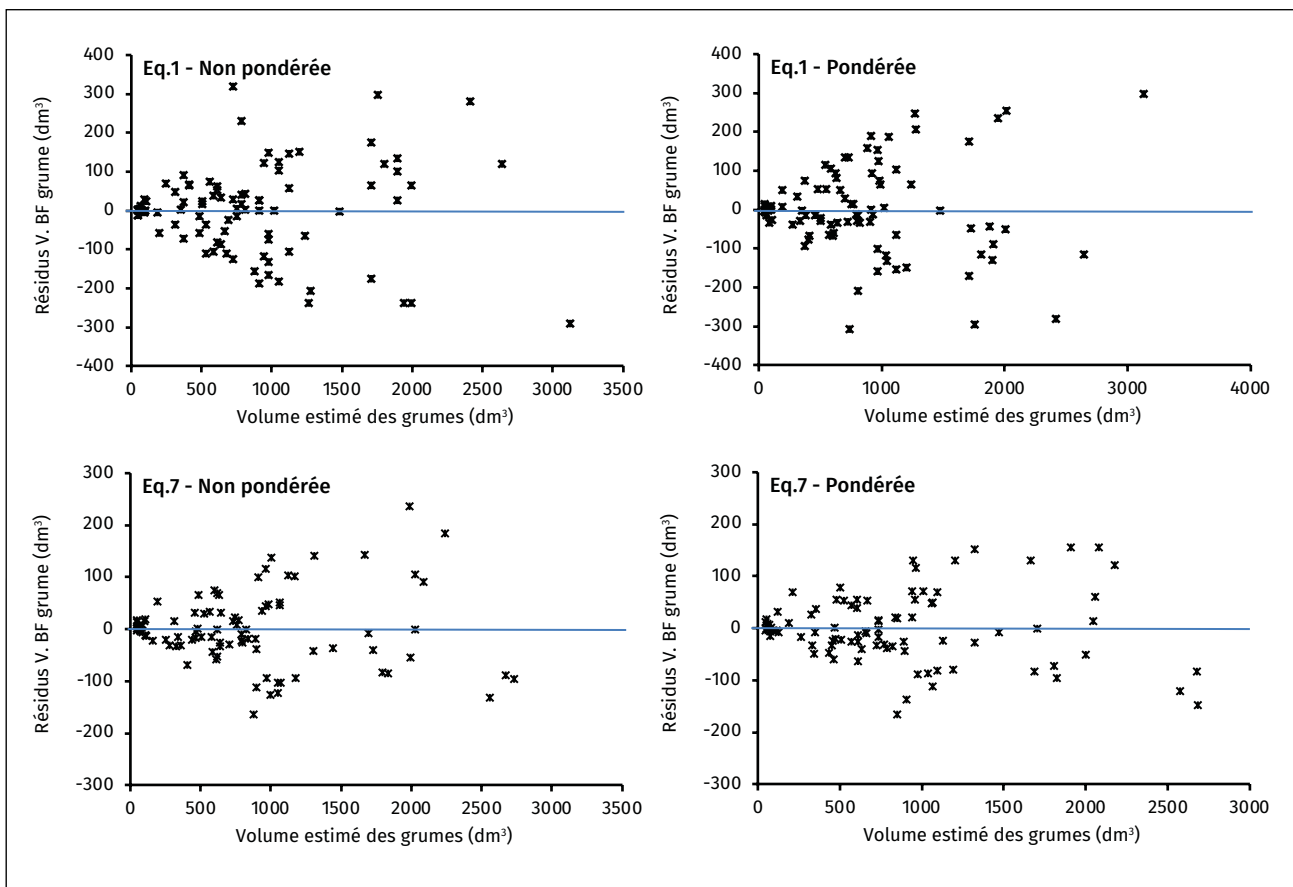
Type	Eq.	Par.	Esti.	$p >  t $	Capacité d'ajustement						Capacité de prédiction					
					Biais	RMSE	$S_a$	$S_r$	$Z_{obs}$	$R_{aj}^2$	Biais <sub>p</sub>	RMSE <sub>p</sub>	$S_{op}$	$S_{rp}$	$Z_{p,obs}$	$R_{press}^2$
Tarifs non pondérés	1	$a_0$	228,101	0,0179	0	116,361	114,38	0,137	0,24	0,9677	-0,602	123,615	121,514	0,142	0,44	0,9644
		$a_1$	-30,650	< 0,0001												
		$a_2$	1,280	< 0,0001												
	7	$a_0$	0,04351	< 0,0001	-0,855	71,611	70,393	0,095	0,21	0,9878	-2,084	78,03	76,703	0,097	0,84	0,9858
		$a_1$	2,217	< 0,0001												
		$a_2$	0,6665	< 0,0001												
Tarifs pondérés	1	$a_0$	227,681	< 0,0001	0,006	116,700	114,036	0,139	0,36	0,9675	0,378	125,24	122,393	0,146	0,53	0,9638
		$a_1$	-30,996	< 0,0001												
		$a_2$	1,287	< 0,0001												
	7	$a_0$	0,05158	< 0,0001	-1,183	67,856	66,313	0,099	0,95	0,9890	-2,400	76,216	74,483	0,101	0,93	0,9866
		$a_1$	2,146	< 0,0001												
		$a_2$	0,6986	< 0,0001												

Eq. : équation ; Par. : paramètre ; Esti. : valeur estimée ;  $p > |t|$  : probabilité associée aux estimateurs des paramètres; Biais : le biais basé sur la moyenne des résidus ; RMSE : racine de l'erreur quadratique moyenne (root-mean-square error) ;  $S_a$  : moyenne quadratique des résidus absolus ;  $S_r$  : moyenne quadratique des résidus relatifs ;  $Z_{obs}$  : valeur du test de Von Neumann ;  $R_{aj}^2$  : coefficient de détermination ajusté ; Biais<sub>p</sub> : biais de prédiction ; RMSE<sub>p</sub> : racine de l'erreur quadratique moyenne de prédiction ;  $S_{op}$  : moyenne quadratique des résidus absolus de prédiction ;  $S_{rp}$  : moyenne quadratique des résidus relatifs de prédiction ;  $Z_{p,obs}$  : valeur du test de Von Neumann de prédiction ;  $R_{press}^2$  : coefficient de détermination de prédiction.

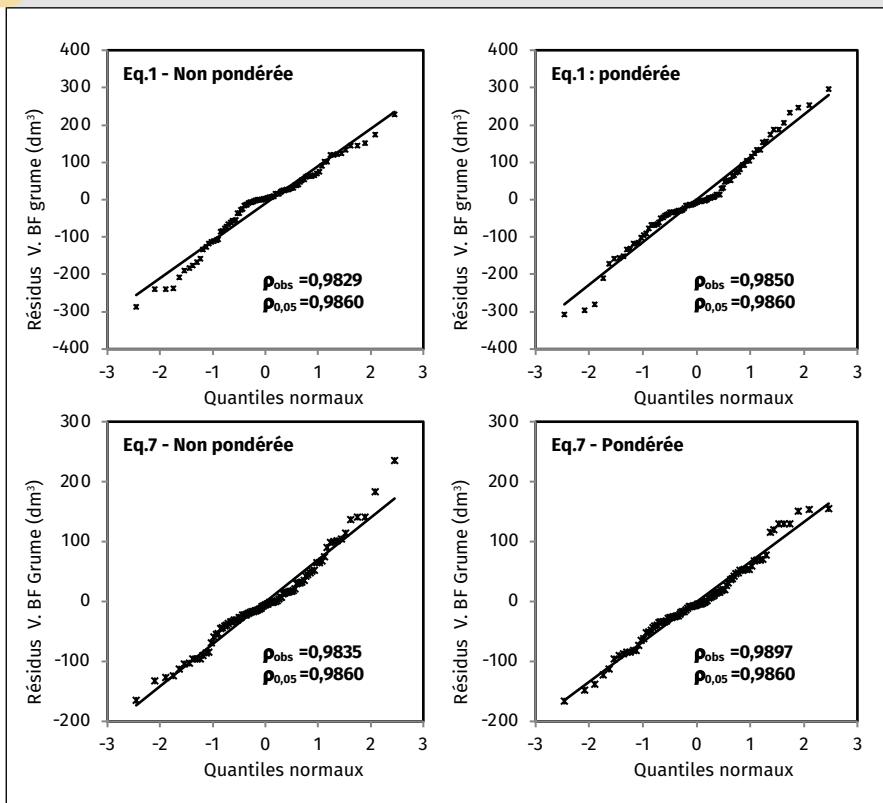




**Figure 4.** Répartition des moyennes quadratiques des résidus absolus ( $S_a$ ) et des moyennes quadratiques des résidus relatifs ( $S_r$ ) par classe de diamètre pour les tarifs de cubage de bois fort (BF) des grumes de pin maritime (*Pinus pinaster*) à une entrée (Eq.1) et à deux entrées (Eq.7) sans et avec pondération des erreurs au diamètre à hauteur de poitrine (DHP).  
 Distribution of root mean squared absolute residuals ( $S_a$ ) and root mean squared relative residuals ( $S_r$ ) by diameter class for large timber (BF) cubing rates of maritime pine (*Pinus pinaster*) for single-entry (Eq.1) and double-entry (Eq.7) logs without and with error weighting at diameter at breast height (DHP).



**Figure 5.** Projection des résidus en fonction des volumes estimés de bois fort (BF) des grumes de pin maritime (*Pinus pinaster*) (homoscédasticité) pour les tarifs à une entrée (Eq.1) et à deux entrées (Eq.7) sans et avec pondération des erreurs au diamètre à hauteur de poitrine (DHP).  
 Projection of residuals as a function of estimated maritime pine (*Pinus pinaster*) log volumes of large timber (BF) (homoscedasticity) for one-input (Eq.1) and two-input (Eq.7) tariffs without and with error weighting at breast height diameter (DHP).



**Figure 6.** Normalité de la distribution des résidus (QQ-probability plots) issus des tarifs à une entrée (Eq.1) et à deux entrées (Eq.7) sans et avec pondération des erreurs au diamètre à hauteur de poitrine (DHP) de pin maritime (*Pinus pinaster*).  
Normality of the distribution of residuals (QQ-probability plots) from the one-input (Eq.1) and two-input (Eq.7) tariffs without and with error weighting at diameter at breast height (DHP) of maritime pine (*Pinus pinaster*).

La figure 7 présente la projection en fonction du DHP des volumes observés et des volumes estimés à l'aide des tarifs pondérés à une entrée (Eq.1) et à deux entrées (Eq.7).

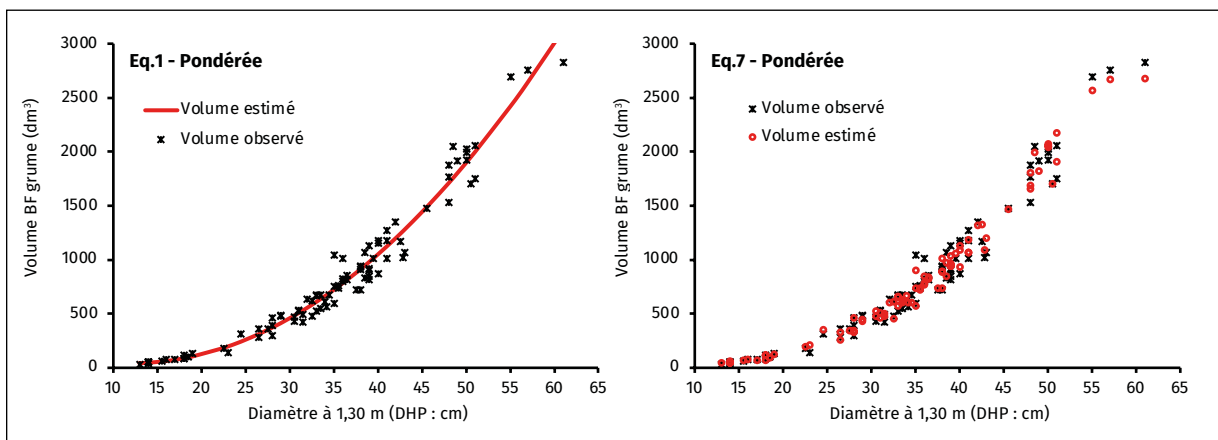
Le tableau IV présente les tables de cubage à une et à deux entrées relatives aux volumes totaux du BF des grumes de pin maritime générées par les tarifs pondérés (Eq.1 et Eq.7) pour des classes de 10 cm de DHP et de 2 m de hauteur.

### Tarifs de cubage à diamètre et longueur variables

Le tableau V présente les valeurs et les tests de signification des paramètres estimés ( $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4$  et  $b_5$ ) et le tableau VI montre les précisions statistiques des différentes équations du système S1 ajusté (équations Eq.16 à Eq.19). Les valeurs des paramètres  $a_0, a_1$  et  $a_2$  étant fixes, elles sont égales à celles estimées pour la fonction pondérée Eq.7 dans le cas du volume de la grume (tableau III).

La figure 8, présentant la relation entre les valeurs observées et celles estimées par les fonctions du système S1 relatives aux tarifs de cubage à diamètre et longueur variables, permet d'apprécier la qualité des ajustements. La parfaite linéarité entre les valeurs observées et celles estimées confirme la bonne qualité des ajustements effectués.

Des tables de cubage à diamètre et longueur variables des grumes peuvent être générées à partir des équations ajustées du système S1 ( $d_{ij}, h_{ij}, vd_{ij}$  et  $vh_{ij}$ ). Deux cas de simulation sont possibles à l'aide



**Figure 7.** Projection en fonction du diamètre à hauteur de poitrine (DHP) des volumes observés et des volumes estimés de pin maritime (*Pinus pinaster*) à l'aide des tarifs pondérés à une entrée (Eq.1) et à deux entrées (Eq.7) retenus pour le cubage des grumes du pin maritime en Tunisie.  
Projection as a function of diameter at breast height (DHP) of observed volumes and estimated volumes of maritime pine (*Pinus pinaster*) using the weighted one-entry (Eq.1) and two-entry (Eq.7) tariffs adopted for the cubing of maritime pine logs in Tunisia.

**Tableau IV.**

Tables de cubage à une (Eq.1 pondérée) et à deux entrées (Eq.7 pondérée) des grumes d'arbres de pin maritime (*Pinus pinaster*) en Tunisie : volumes totaux de bois fort (BF) en dm<sup>3</sup>.  
 Single-entry (Eq.1 weighted) and double-entry (Eq.7 weighted) volume tables for logs of maritime pine (*Pinus pinaster*) trees in Tunisia: total volumes of large timber (BF) in dm<sup>3</sup>.

Classes de DHP (cm)	DHP (cm)	Grumes : tarif à deux entrées CV% = 7,96										Tarif à une entrée CV% = 13,69
		Hauteur totale (m)										
		5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	
		≤ 6	]6-8]	]8-10]	]10-12]	]12-14]	]14-16]	]16-18]	]18-20]	]19-21]	≥ 21	
≤ 17,5	15	53,049	67,106	79,985	92,022	103,413	114,285	124,728	134,806	144,569	154,055	52,316
]17,5-22,5]	20	98,354	124,416	148,295	170,612	191,731	211,889	231,251	249,936	268,037	285,624	122,561
]22,5-27,5]	25	158,767	200,838	239,384	275,409	309,501	342,041	373,295	403,458	432,676	461,067	257,156
]27,5-32,5]	30	234,792	297,009	354,011	407,287	457,704	505,826	552,046	596,652	639,861	681,847	456,101
]32,5-37,5]	35	326,852	413,463	492,816	566,981	637,165	704,156	768,498	830,594	890,746	949,193	719,396
]37,5-42,5]	40	435,314	550,665	656,351	755,125	848,600	937,820	1 023,514	1 106,214	1 186,327	1 264,169	1 047,041
]42,5-47,5]	45	560,500	709,024	845,102	972,282	1 092,638	1 207,516	1 317,853	1 424,337	1 527,488	1 627,715	1 439,036
]47,5-52,5]	50	702,702	888,907	1 059,509	1 218,956	1 369,846	1 513,869	1 652,200	1 785,699	1 915,020	2 040,676	1 895,381
> 52,5	55	862,184	1 090,649	1 299,970	1 495,604	1 680,740	1 857,450	2 027,175	2 190,973	2 349,644	2 503,818	2 416,076

**Tableau V.**

Valeurs et tests de signification des estimations des paramètres du système S1 d'équations simultanées relatives aux tarifs de cubage des grumes de pin maritime (*Pinus pinaster*) à diamètre et longueur variables.

Values and significance tests of the estimates of the parameters of the S1 system of simultaneous equations relating to the volume equations for maritime pine (*Pinus pinaster*) logs of variable diameter and length.

Paramètre	Estimation	E.S.	p >  t
b <sub>0</sub>	-0,3622	0,0438	<0,0001
b <sub>1</sub>	4,4838	0,0336	<0,0001
b <sub>2</sub>	4,1062	0,0420	<0,0001
b <sub>3</sub>	-2,0030	0,1363	<0,0001
b <sub>4</sub>	3,5347	0,0230	<0,0001
b <sub>5</sub>	3,4768	0,0315	<0,0001

E.S.: erreur-standard.

**Table VI.**

Précisions des tarifs de cubage à diamètre et longueur variables pour le pin maritime (*Pinus pinaster*).

Precision of the volume equations for maritime pine (*Pinus pinaster*) of variable diameter and length.

Variable	Fonction	Paramètres	Biais	RMSE	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>
Volume global	Eq.7	a <sub>0</sub> , a <sub>1</sub> , a <sub>2</sub>	-1,1830	67,856	0,9890
Volume cumulé vd <sub>ij</sub> (dm <sup>3</sup> )	Eq.17	a <sub>0</sub> , a <sub>1</sub> , a <sub>2</sub> , b <sub>0</sub> , b <sub>1</sub> , b <sub>2</sub>	0,3844	45,2295	0,9942
Volume cumulé vh <sub>ij</sub> (dm <sup>3</sup> )	Eq.18	a <sub>0</sub> , a <sub>1</sub> , a <sub>2</sub> , b <sub>0</sub> , b <sub>1</sub> , b <sub>5</sub>	3,6078	22,8937	0,9985
d <sub>ij</sub> (cm)	Eq.19	b <sub>0</sub> , b <sub>1</sub> , b <sub>2</sub> , b <sub>3</sub> , b <sub>4</sub> , b <sub>5</sub>	0,0980	1,1781	0,9881
h <sub>ij</sub> (m)	Eq.20	b <sub>0</sub> , b <sub>1</sub> , b <sub>2</sub> , b <sub>3</sub> , b <sub>4</sub> , b <sub>5</sub>	0,0195	0,5010	0,9905

Eq. : équation ; vd<sub>ij</sub> : volume cumulé ; vh<sub>ij</sub> : volume cumulé. Biais : le biais basé sur la moyenne des résidus ; d<sub>ij</sub> : diamètre de l'arbre i au niveau de coupe j ; h<sub>ij</sub> : hauteur de l'arbre i au niveau de coupe j ; RMSE : racine de l'erreur quadratique moyenne (root-mean-square error) ; R<sup>2</sup><sub>aj</sub> : coefficient de détermination ajusté.

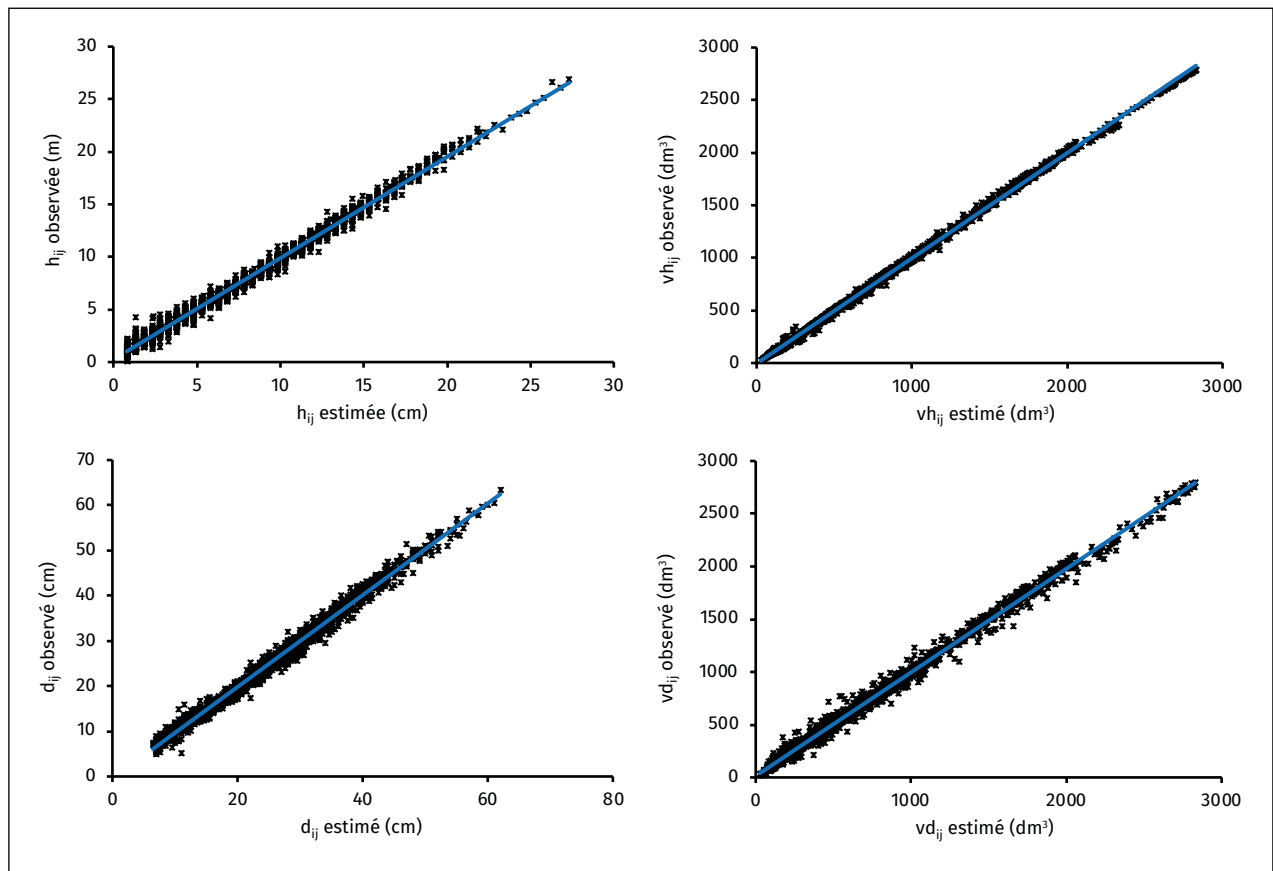
de ces équations. On peut, soit fixer le diamètre fin-bout de la grume  $d_{ij}$  et calculer la hauteur  $h_{ij}$  et le volume  $vh_{ij}$  correspondants, soit fixer la hauteur  $h_{ij}$  et calculer le diamètre fin-bout  $d_{ij}$  et le volume  $vd_{ij}$  correspondants. Dans la pratique, on utilise la première approche qui permet de fixer un diamètre marchand donné  $d_{ij}$  et de calculer la longueur ou la hauteur jusqu'à ce diamètre et le volume du bois de cette partie de la grume. Pour déterminer la longueur et le volume d'une portion de la grume située entre deux diamètres  $d_{i1}$  et  $d_{i2}$  ( $d_{i1} > d_{i2}$ ), les hauteurs et les volumes de la grume aux deux niveaux de coupe  $h_{i1}$ ,  $h_{i2}$ ,  $vh_{i1}$  et  $vh_{i2}$  doivent être déterminés séparément, puis il s'agit de calculer par la suite la différence entre les deux niveaux de mesures ( $h_{i2} - h_{i1}$  et  $vh_{i2} - vh_{i1}$ ). Il est à noter que pour un même niveau de coupe  $j$ , les deux volumes  $vh_{ij}$  et  $vd_{ij}$  sont identiques. Le tableau VII, pouvant être généré pour n'importe quel diamètre fin-bout de la grume, donne un exemple de table de cubage à longueur variable pour un diamètre fin-bout fixé à 20 cm. Deux conditions ont été imposées à la procédure de simulation :

- Seules les grumes estimées dont la longueur  $h_{ij}$  est au moins égale à 0,5 m apparaissent dans la table de cubage.
- Lorsque  $d_{ij} \leq 7$  cm (diamètre fin-bout limite utilisé pour indiquer le bois fort de la grume d'un arbre),  $d_{ij}$  sera nul (0) et la table de cubage estimée sera identique au tableau IV relatif au volume total du bois fort de la grume (tarif à deux entrées).

## Discussion

Le tarif à une entrée retenu pour l'estimation du volume BF de la grume d'arbre individuel de pin maritime en Tunisie a la forme d'une fonction quadratique ou encore d'une fonction polynomiale de second degré (Eq.1) qui exprime le volume en fonction du DHP avec un  $R^2$  de l'ordre de 97 %. Alaoui *et al.* (2011) ont utilisé cette même fonction pour élaborer un tarif de cubage à une entrée pour les plantations du pin maritime dans la région de Mâamoura au Maroc avec un  $R^2$  de l'ordre de 93 %. De leur côté, Kitikidou *et al.* (2017) ont ajusté la même fonction pour élaborer un tarif de cubage pour le pin de Calabre (*Pinus brutia*), une espèce très proche du pin maritime, dans les plantations des forêts périurbaines en Grèce avec un  $R^2$  de l'ordre de 79 %.

Comme le volume d'un arbre augmente généralement avec le DHP, le recours aux tarifs à une entrée, plus simples et plus faciles à manipuler, est très délicat car la relation entre le volume et le diamètre pour une essence donnée évolue en fonction de la station, du type de peuplement et du stade de développement ou de l'âge des arbres (Prégent *et al.*, 2001 ; Deleuze *et al.*, 2014). De ce fait, des tarifs de cubage plus précis, dits à deux entrées, qui utilisent



**Figure 8.**

Projection des valeurs observées en fonction des valeurs estimées à l'aide des différentes fonctions ajustées par le système d'équations simultanées (S1) relatives aux tarifs de cubage à diamètre et longueur variables de pin maritime (*Pinus pinaster*).  
Projection of the observed values as a function of the values estimated using the various functions fitted by the simultaneous system of equations (S1) relating to the variable diameter and length cubing rates for maritime pine (*Pinus pinaster*).

**Tableau VII.**

Table de cubage : volumes marchands ( $vh_{ij}$ ;  $dm^3$ ) bois fort (BF) des grumes d'arbres de pin maritime (*Pinus pinaster*) pour un diamètre fin-bout  $d_{ij} = 20$  cm et une longueur des grumes  $\geq 0,5$  m. DHP : diamètre à hauteur de poitrine.  
 Cubage table: merchantable volumes ( $vh_{ij}$ ,  $dm^3$ ) of large timber (BF) from maritime pine (*Pinus pinaster* logs) for an end-to-end diameter  $d_{ij} = 20$  cm and a log length  $\geq 0.5$  m. DHP: diameter at breast height (DBH).

Classe de DHP	DHP (cm)	$h_{ij}$ (m)	Hauteur totale des arbres (m)										
			5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	
≤ 17,5	15	$h_{ij}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
		$vh_{ij}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
17,5-22,5	20	$h_{ij}$	0,87	1,24	1,63	2,02	2,42	2,82	3,22	3,63	4,04	4,45	
		$vh_{ij}$	72,207	91,340	108,871	125,255	140,759	155,559	169,773	183,491	196,779	209,691	
22,5-27,5	25	$h_{ij}$	1,81	2,56	3,31	4,07	4,83	5,6	6,37	7,14	7,91	8,69	
		$vh_{ij}$	140,305	177,484	211,547	243,383	273,511	302,267	329,887	356,542	382,363	407,452	
27,5-32,5	30	$h_{ij}$	2,42	3,41	4,4	5,39	6,39	7,39	8,4	9,4	10,41	11,42	
		$vh_{ij}$	221,457	280,140	333,905	384,155	431,708	477,097	520,692	562,764	603,520	643,121	
32,5-37,5	35	$h_{ij}$	2,84	4	5,15	6,31	7,48	8,64	9,81	10,98	12,15	13,32	
		$vh_{ij}$	316,860	400,823	477,750	549,647	617,686	682,628	745,004	805,200	863,514	920,174	
37,5-42,5	40	$h_{ij}$	3,15	4,43	5,71	6,99	8,27	9,56	10,84	12,13	13,42	14,71	
		$vh_{ij}$	427,572	540,872	644,678	741,696	833,508	921,141	1 005,311	1 086,541	1 165,229	1 241,687	
42,5-47,5	45	$h_{ij}$	3,39	4,76	6,13	7,5	8,87	10,25	11,63	13,01	14,39	15,77	
		$vh_{ij}$	554,333	701,223	835,804	961,585	1 080,616	1 194,230	1 303,354	1 408,666	1 510,682	1 609,807	
47,5-52,5	50	$h_{ij}$	3,57	5,01	6,46	7,9	9,35	10,8	12,25	13,7	15,15	16,6	
		$vh_{ij}$	697,677	882,550	1 051,932	1 210,237	1 360,049	1 503,042	1 640,383	1 772,927	1 901,324	2 026,081	
52,5-57,5	55	$h_{ij}$	3,72	5,22	6,72	8,23	9,73	11,24	12,75	14,25	15,76	17,27	
		$vh_{ij}$	858,010	1 085,369	1 293,677	1 488,363	1 672,603	1 848,457	2 017,361	2 180,365	2 338,268	2 491,696	
57,5-62,5	60	$h_{ij}$	3,85	5,39	6,94	8,49	10,05	11,6	13,16	14,71	16,27	17,82	
		$vh_{ij}$	1 035,666	1 310,101	1 561,540	1 796,538	2 018,925	2 231,191	2 435,068	2 631,823	2 822,421	3 007,617	
62,5-67,5	65	$h_{ij}$	3,95	5,54	7,13	8,72	10,31	11,9	13,5	15,09	16,69	18,28	
		$vh_{ij}$	1 230,927	1 557,103	1 855,948	2 135,251	2 399,566	2 651,852	2 894,167	3 128,018	3 354,551	3 574,662	
67,5-72,5	70	$h_{ij}$	4,04	5,66	7,28	8,91	10,53	12,16	13,79	15,41	17,04	18,67	
		$vh_{ij}$	1 444,040	1 826,687	2 177,271	2 504,931	2 815,008	3 110,972	3 395,239	3 669,577	3 935,330	4 193,550	

$h_{ij}$  : hauteur de l'arbre i au niveau de coupe j ;  $vh_{ij}$  : volume cumulé de l'arbre i jusqu'à la hauteur au niveau de coupe j.

comme variables indépendantes pour estimer le volume BF d'un arbre le DHP et la hauteur totale de ce dernier sont souvent élaborés. Le tarif à deux entrées, relatif à l'estimation du volume BF des grumes d'arbre individuel du pin maritime en Tunisie, découle de la fonction Eq.7 avec une précision de l'ordre de 99 %. La même fonction (Eq.7) a été utilisée pour ajuster des tarifs de cubage à deux entrées sur et sous écorce pour le pin de Calabre dans le Kurdistan de l'Iraq (Sagvan *et al.*, 2018) avec des précisions de l'ordre de 96 % pour le tarif sur écorce et 90 % pour celui sous écorce. Sghaier *et al.* (2013) ont également ajusté la même fonction (Eq.7) comme tarif de cubage à deux entrées pour l'estimation du bois fort des arbres individuels dans les plantations du pin pignon du nord-ouest de la Tunisie avec

une précision de l'ordre de 96 %. Du point de vue de leur utilisation, les tarifs à une entrée sont moins précis mais plus faciles à mettre en œuvre et peuvent être utilisés en aménagement, tandis que les tarifs à deux entrées, plus précis et également appelés tarifs d'exploitation, peuvent être utilisés pour la vente du bois sur pied (Sghaier *et al.*, 2013).

Pour situer et comparer les deux tarifs globaux à une et à deux entrées élaborés dans le cadre de cette étude par rapport à d'autres tarifs ajustés pour la même espèce, nous nous sommes basés sur trois études similaires réalisées au Maroc (Alaoui *et al.*, 2011), au Portugal (Freire *et al.*, 2003) et en Iran (Yousefpour *et al.*, 2012). Il s'agit de deux tarifs à une et à deux entrées développés à l'échelle de l'arbre pour les

plantations de pin maritime dans la région de Mâmoura au Maroc, d'un tarif à deux entrées élaboré pour un reboisement de la même espèce situé dans le noyau forestier de la

Oitava (Serra da Lousã) au Portugal, et finalement de deux tarifs à une et à deux entrées ajustés pour les plantations de pin maritime de la région de Kiashahr (nord de l'Iran). Le

tableau VIII présente la forme et la valeur des paramètres et la précision de ces équations utilisées comme base de comparaison avec nos deux tarifs de cubage.

La figure 9 présente les résultats de comparaison des deux tarifs de cubages de pin maritime développés en Tunisie avec ceux des autres tarifs élaborés et utilisés comme base de comparaison (tableau VIII). La figure 9a présente la projection des arbres échantillonnés en fonction du DHP et les courbes simulées à l'aide des tarifs de cubage à une entrée ajustés en Tunisie, au Maroc et en Iran. D'après cette figure, les deux tarifs tunisien et marocain donnent des estimations très proches jusqu'à environ 45 cm de diamètre ; au-delà de cette dimension des tiges, le tarif marocain donne des valeurs estimées plus faibles. Le tarif iranien s'écarte quant à lui d'une façon remarquable des deux tarifs précédents à partir

**Table VIII.**

Équations de volume de bois fort (BF) à une et à deux entrées développées pour le cubage de pin maritime (*Pinus pinaster*) au Maroc, au Portugal et en Iran.

*One- and two-input large timber (BF) volume equations developed for maritime pine (Pinus pinaster) cubing in Morocco, Portugal and Iran.*

Type de tarif	Équation	Paramètres	Unités	R2	Pays	Référence
Une entrée	$v = b_0 + b_1 C + b_2 x C^2$	$b_0 = 1,49$ $b_1 = -1,63$ $b_2 = 0,077$	C : cm V : dm <sup>3</sup>	0,93	Maroc	Alaoui et al. (2011)
	$v = b_0 D + b_1 x D^2$	$b_0 = -2,7 \times 10^{-4}$ $b_1 = 3,46 \times 10^{-4}$	D : cm V : m <sup>3</sup>	0,89	Iran	Yousefpour et al. (2012)
Deux entrées	$v = b_0 C^2 + b_1 H + b_2 C^2 H$	$b_0 = 0,0115$ $b_1 = -0,02$ $b_2 = 0,0031$	C : cm H : m V : dm <sup>3</sup>	0,95	Maroc	Alaoui et al. (2011)
	$v = b_0 D^{b_1} (H^2 / (H - 1,3))^{b_2}$	$b_0 = 1,677 \times 10^{-5}$ $b_1 = 1,984$ $b_2 = 1,211$	D : cm H : m V : m <sup>3</sup>	0,98	Iran	Yousefpour et al. (2012)
	$v = \exp(b_0 + b_1 H + b_2 \log(D))$	$b_0 = -7,9411$ $b_1 = 0,0538$ $b_2 = 1,8659$	D : cm H : m V : m <sup>3</sup>	0,98	Portugal	Freire et al. (2003)

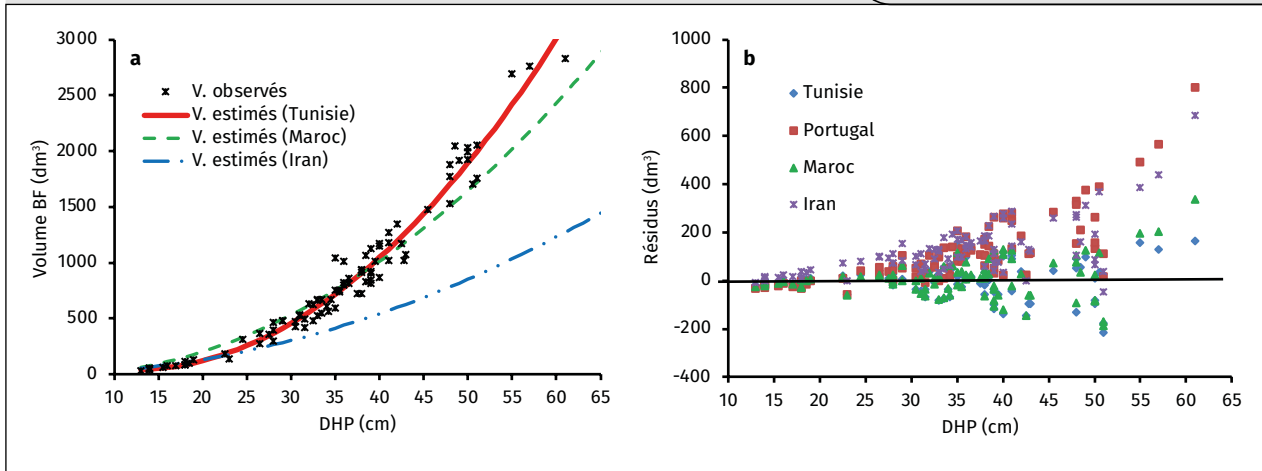
**Tableau IX.**

Application des équations du système S1 pour sept arbres représentatifs de pin maritime (*Pinus pinaster*) issus de la base de données étudiée : volumes observé et estimé de la tige ; volumes jusqu'à différentes découpes de diamètre (Eq.16) ; volumes jusqu'à différentes découpes en hauteur (Eq.17) ; diamètre fin-bout pour une longueur de tige de 5 m (Eq.18) et longueur de la tige pour un diamètre fin-bout de 15 cm (Eq.19).

*Application of the equations of system S1 for seven representative maritime pine (Pinus pinaster) trees from the database studied: observed and estimated stem volumes; volumes up to different diameter cuts (Eq.16); volumes up to different height cuts (Eq.17); end-to-end diameter for a stem length of 5 m (Eq.18) and stem length for an end-to-end diameter of 15 cm (Eq.19).*

Parcelle	N° arbre	DHP (cm)	H (m)	V <sub>obs</sub> (dm <sup>3</sup> )	V <sub>est</sub> (dm <sup>3</sup> )	V <sub>d15</sub> (dm <sup>3</sup> )	V <sub>d35</sub> (dm <sup>3</sup> )	V <sub>d15-35</sub> (dm <sup>3</sup> )	V <sub>h5</sub> (dm <sup>3</sup> )	V <sub>h10</sub> (dm <sup>3</sup> )	V <sub>h5-10</sub> (dm <sup>3</sup> )	d <sub>h5</sub> (cm)	h <sub>d15</sub> (m)
70	26	57	22	2 759,810	2 620,627	2 609,667	2 173,264	436,403	1 000,442	1 978,364	977,922	50,43	18,35
75	2	49	20,7	1 918,510	1 815,428	1 801,325	1 281,483	519,842	739,292	1 440,005	700,713	43,24	16,60
48	31	43	16,3	1 069,560	1 160,751	1 145,376	639,897	505,479	609,089	1 069,617	460,527	35,63	12,53
27	29	39	15,5	812,890	908,807	890,891	373,497	517,395	502,488	855,652	353,164	31,97	11,48
16	22	36	16,5	823,110	799,541	777,731	232,478	545,252	414,225	732,536	318,311	30,41	11,81
67	20	31	13,8	523,360	511,992	486,483	52,238	434,245	318,289	499,636	181,347	24,67	9,12
12	20	24,5	12,6	314,520	289,968	253,525	0,720	252,805	196,631	287,438	90,807	19,01	6,97

V<sub>obs</sub> : volume observé ; V<sub>est</sub> : volume estimé ; V<sub>d15</sub> : volume jusqu'à 15 cm de diamètre ; V<sub>d35</sub> : volume jusqu'à 35 cm de diamètre ; V<sub>d15-35</sub> : volume du billon entre les découpes 15 et 35 cm ; V<sub>h5</sub> : volume jusqu'à 5 m de hauteur ; V<sub>h10</sub> : volume jusqu'à 10 m de hauteur ; V<sub>h5-10</sub> : volume du billon entre 5 et 10 m de hauteur ; d<sub>h5</sub> : diamètre de la tige à une hauteur de 5 m ; h<sub>d15</sub> : hauteur de la tige jusqu'à la découpe 15 cm.



**Figure 9.**

(a) : projection des volumes de bois fort (BF) observés des arbres de pin maritime (*Pinus pinaster*) échantillonnés en fonction du diamètre à hauteur de poitrine DHP et courbes simulées à l'aide du tarif de cubage à une entrée ajusté en Tunisie (cette étude), au Maroc et en Iran ; (b) : projection des résidus en fonction du DHP obtenus par l'utilisation des tarifs à deux entrées ajustés en Tunisie, au Portugal, au Maroc et en Iran.

(a): projection of observed volumes of large timber (BF) from sampled maritime pine (*Pinus pinaster*) trees as a function of diameter at breast height (DHP) and curves simulated using the adjusted single-entry cubing tariff in Tunisia (this study), Morocco and Iran;

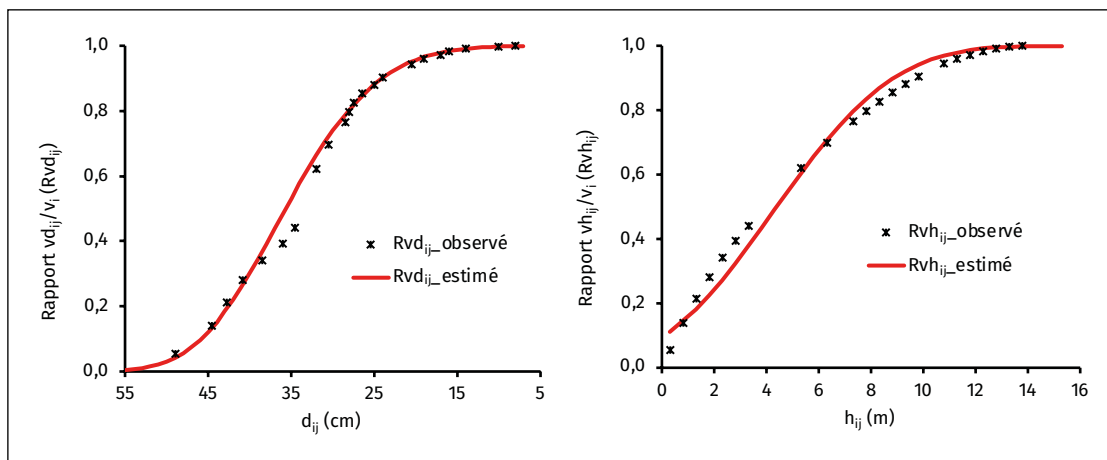
(b): projection of residuals as a function of DHP obtained using the adjusted two-entry tariffs in Tunisia, Portugal, Morocco and Iran.

d'environ 28 cm de diamètre. Pour comparer les tarifs à deux entrées, ces derniers ont été utilisés pour faire des estimations du volume des arbres échantillonnés et calculer les résidus issus de chaque tarif (Tunisie, Maroc, Portugal, et Iran). La figure 9b présente la projection de ces résidus en fonction du DHP. Il ressort de la figure 9b que les deux tarifs tunisien et marocain sont les plus proches et donnent des résidus comparables jusqu'à environ 50 cm de diamètre. Les deux autres tarifs portugais et iranien sous-estiment quant à eux le volume et donnent des résidus positifs à partir de 25 cm de diamètre environ. Comme les tarifs de cubage dépendent fortement des caractéristiques dendrométriques des arbres cubés et que ces dernières dépendent des conditions édaphiques et climatiques, la similitude observée entre les tarifs développés en Tunisie et au Maroc pour les tiges de moins de 50 cm de diamètre peut être expliquée par les conditions édaphiques et climatiques qui se ressemblent, étant donné que les deux pays se trouvent au nord de l'Afrique et dans la rive sud de la Méditerranée. La figure 9b montre également un ressemblance entre les deux tarifs à deux entrées développés au Portugal et en Iran, surtout pour les tiges de plus de 25 cm de diamètre environ où on observe une parfaite superposition des résidus issus de ces deux tarifs. Cette similitude dans le comportement des deux tarifs à deux entrées développés au Portugal et en Iran peut être expliquée d'une part par le caractère jeune des peuplements étudiés qui avaient 25 et 16 ans respectivement au moment des mesures (l'âge des plantations de pin maritime étudiées en Tunisie varie de 43 à 69 ans), et d'autre part par des caractéristiques pédoclimatiques probablement semblables des zones d'étude dans les deux pays.

En plus du type ou de la qualité du bois à transformer, les industriels de bois sont devenus de plus en plus exigeants en ce qui concerne les caractéristiques dendro-

métriques (diamètre et longueur des grumes) du bois à procurer. De ce fait, le recours à des tarifs traditionnels n'est plus suffisant. Pour répondre aux besoins des industriels, d'autres tarifs basés sur des équations de défilement qui décrivent mathématiquement le profil des tiges d'arbres, connus aussi sous le nom de tarifs à « diamètre et longueur variables », peuvent être élaborés. C'est dans ce contexte que des tarifs de cubage dits « tarifs marchands » ont été développés pour le pin maritime dans le cadre de cette étude en Tunisie. Des tarifs similaires ont été développés ces deux dernières décennies pour différentes espèces forestières (Prégent *et al.*, 2001, 2016 ; Crecente-Campo *et al.*, 2009 ; Heidarsson et Pukkala, 2011 ; Burkhart et Tomé, 2012 ; Calama *et al.*, 2012 ; Hjelm, 2013 ; Özçelik et Göçeri, 2015 ; Sghaier *et al.*, 2015 ; Lumbres *et al.*, 2016 ; Doyog *et al.*, 2017 ; Özçelik et Crecente-Campo, 2016 ; Tang *et al.*, 2017 ; Shahzad *et al.*, 2020 ; Sghaier et Ammari, 2022). L'ajustement simultané des quatre équations du système S1 a permis de prédire pour le pin maritime en Tunisie, avec des précisions de l'ordre de 99 %, (i) le diamètre de la grume jusqu'à une hauteur donnée, (ii) la hauteur de la grume jusqu'à un diamètre fin-bout donné, (iii) le volume cumulé de la grume jusqu'à un diamètre donné et (iv) le volume cumulé de la grume jusqu'à une hauteur donnée.

Afin d'illustrer l'application de ce système d'équations pour la prédiction des volumes et des longueurs des grumes d'arbres individuels de pin maritime en Tunisie, nous avons choisi quelques arbres représentatifs des différentes classes de diamètre des arbres échantillonnés. Les variables estimées concernent les différentes grandeurs de la grume (volume total et partiel, diamètres et longueur des billons). Le tableau IX contient les résultats de ces estimations qui concernent le volume observé et le volume estimé de la grume jusqu'à découpe de 7 cm de diamètre fin-bout (découpe bois fort) ; les volumes jusqu'aux différentes



**Figure 10.**

Rapports de volumes observés et estimés pour un arbre échantillon de pin maritime (*Pinus pinaster*) (arbre n° 1; placette n° 14) de caractéristiques dendrométriques moyennes (DS = 49 cm ; DHP = 42,8 cm ; H = 15,6 m ; HBF = 13,8 m). DS : diamètre de la souche ; DHP : diamètre à hauteur de poitrine ; H : hauteur totale de l'arbre ; HBF : hauteur bois fort.

Observed and estimated volume ratios for a sample tree of maritime pine (*Pinus pinaster*) (tree no. 1; plot no. 14) with average dendrometric characteristics (DS = 49 cm ; DHP = 42.8 cm ; H = 15.6 m ; HBF = 13.8 m). DS: diameter of the stump; DHP: diameter at breast height (DBH); H: total height of the tree; HBF: height of large timber.

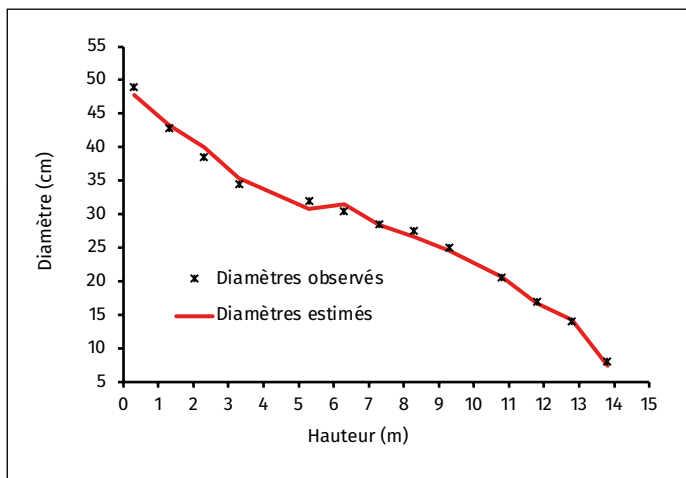
découpes de diamètre (Eq.16) ; les volumes jusqu'aux différentes découpes en hauteur (Eq.17) ; le diamètre fin-bout pour une longueur de tige de 5 m (Eq.18) et la longueur de la tige pour un diamètre fin-bout de 15 cm (Eq.19).

Finalement et afin d'illustrer graphiquement la qualité d'ajustement des équations de défilement élaborées, la figure 10 présente pour un arbre de caractéristiques den-

drométriques moyennes de l'échantillon les valeurs observées et celles estimées à l'aide de deux fonctions de rapports de volume (Eq.11 et Eq.15). La figure 11 illustre pour le même arbre la possibilité de prédire le profil de la tige avec la fonction de défilement ajustée (Eq.18).

## Conclusion

Deux tarifs de cubage dits « tarifs globaux » à une et deux entrées qui permettent de prédire le volume total bois fort (BF) des grumes d'arbres individuels de pin maritime, *Pinus pinaster* Ait., en Tunisie ont été élaborés dans le cadre de cette étude. Ces tarifs utilisent comme variables d'entrées le diamètre du tronc à hauteur d'homme (DHP) pour le premier et le DHP et la hauteur totale pour le deuxième. Pour répondre à la demande des industriels de transformation du bois qui exigent la connaissance préalable des caractéristiques dendrométriques des grumes du bois à acquérir, des tarifs de cubage dits « tarifs marchands » ou « tarifs à diamètre et longueur variables » ont été développés grâce à l'ajustement d'un système d'équations simultanées. Ces tarifs marchands permettent de prédire le volume BF jusqu'à n'importe quelle découpe sur la tige ou par assortiments (portions de tiges ou billons de diamètres limites différents). Il est également possible de prédire le diamètre fin-bout pour une longueur fixée de billon ou la longueur de billon pour un diamètre fin-bout fixé. Les tarifs globaux et marchands élaborés pour le pin maritime en Tunisie doivent être appliqués pour des tiges dont le DHP est situé entre environ 15 et 65 cm et dont la hauteur H varie de 6 à 25 m. En dehors de ces limites, les mêmes tarifs doivent être utilisés avec plus de prudence.



**Figure 11.**

Profil d'une tige de pin maritime (*Pinus pinaster*) (arbre n° 1; placette n° 14) issue de la base de données étudiée (DS = 49 cm ; DHP = 42,8 cm ; H = 15,6 m ; HBF = 13,8 m). DS : diamètre de la souche ; DHP : diamètre à hauteur de poitrine ; H : hauteur totale de l'arbre ; HBF : hauteur bois fort.

Profile of a maritime pine (*Pinus pinaster*) stem (tree no. 1; plot no. 14) from the database studied (DS = 49 cm ; DHP = 42.8 cm ; H = 15.6 m ; HBF = 13.8 m). DS: diameter of the stump; DHP: diameter at breast height (DBH); H: total height of the tree; HBF: height of large timber.



## Financement

Cette étude a été entièrement financée par les moyens propres du Laboratoire d'Écologie forestière (LEF) de l'Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et forêts (INRGREF) en Tunisie.

## Conditions d'accès aux données

Les données utilisées pour l'élaboration des tarifs de cubage globaux de cette étude sont disponibles gratuitement et accessibles à partir de ce lien: <https://doi.org/10.57760/sciencedb.17025>. Les données utilisées pour l'ajustement des tarifs commerciaux et qui font encore l'objet d'autres travaux de modélisation dans le cadre de la thèse en cours de Monsieur Iheb Essoussi, peuvent être obtenues en adressant préalablement une demande raisonnable auprès de l'auteur correspondant et en citant cet article.

## Références

- Alaoui A., Laaribya S., Gmira N., 2011. Production, croissance et modèles de conduite sylvicoles des principales essences (le pin maritime et le pin d'Alep) de reboisement au Maroc. *Kastamonu Üni., Orman Fakültesi iDergisi*, 11 (1) : 68-84. [https://www.researchgate.net/publication/317317813\\_Production\\_croissance\\_et\\_modeles\\_de\\_conduite\\_sylvicoles\\_des\\_principales\\_essences\\_le\\_pin\\_maritime\\_et\\_le\\_pin\\_d%27Alep\\_de\\_reboisement\\_au\\_Maroc](https://www.researchgate.net/publication/317317813_Production_croissance_et_modeles_de_conduite_sylvicoles_des_principales_essences_le_pin_maritime_et_le_pin_d%27Alep_de_reboisement_au_Maroc)
- Alia R., Martin S., 2011. Fiche technique pour la conservation génétique et l'utilisation du pin maritime (*Pinus pinaster*). *EUFORGEN*, 6 p. [https://www.euforgen.org/fileadmin/templates/euforgen.org/upload/Countries/France/Technical\\_guidelines/Pinus\\_pinaster\\_FRA.pdf](https://www.euforgen.org/fileadmin/templates/euforgen.org/upload/Countries/France/Technical_guidelines/Pinus_pinaster_FRA.pdf)
- Barrio Anta M., Sixto Blanco H., Cañellas Rey de Viñas I., González Antoñanzas F., 2007. Sistema de cubicación con clasificación de productos para plantaciones de *Populus x euramericana* (Dode) Guinier cv. 'I-214' en la meseta norte y centro de España. *Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales*, 16 (1): 65-75. [https://www.researchgate.net/profile/Isabel-Canellas/publication/28251726\\_Sistema\\_de\\_cubicacion\\_con\\_clasificacion\\_de\\_productos\\_para\\_plantaciones\\_de\\_Populus\\_x\\_euramericana\\_Dode\\_Guinier\\_cv\\_%27I-214%27\\_en\\_la\\_meseta\\_norte\\_y\\_centro\\_de\\_Espana/links/00b7d514311a3dda82000000/Sistema-de-cubicacion-con-clasificacion-de-productos-para-plantaciones-de-Populus-x-euramericana-Dode-Guinier-cv-I-214-en-la-meseta-norte-y-centro-de-Espana.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Isabel-Canellas/publication/28251726_Sistema_de_cubicacion_con_clasificacion_de_productos_para_plantaciones_de_Populus_x_euramericana_Dode_Guinier_cv_%27I-214%27_en_la_meseta_norte_y_centro_de_Espana/links/00b7d514311a3dda82000000/Sistema-de-cubicacion-con-clasificacion-de-productos-para-plantaciones-de-Populus-x-euramericana-Dode-Guinier-cv-I-214-en-la-meseta-norte-y-centro-de-Espana.pdf)
- Bouchon J., 1974. Les tarifs de cubage. *Engref, Nancy*, 57 p. + annexes.
- Bullock B. P., Burkhardt H. E., 2003. Equations for predicting green weight of loblolly pine trees in the south. *Southern Journal of Applied Forestry*, 27 (3): 153-159. <https://academic.oup.com/sjaf/article/27/3/153/4782424>
- Burkhardt H. E., 1977. Cubic-foot volume of loblolly pine to any merchantable top limit. *Southern Journal of Applied Forestry*, 1: 7-9. <https://doi.org/10.1093/sjaf/1.2.7>
- Burkhardt H. E., Tomé M., 2012. Tree Form and Stem Taper Modeling Forest Trees and Stands. In: *Modeling Forest Trees and Stands*, Burkhardt H. E., Tomé M. (eds). Springer Science & Business Media, Netherlands, 9-41. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-3170-9\\_2](https://doi.org/10.1007/978-90-481-3170-9_2)
- Cailliez F., 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento – Vol. 1 - estimación del volumen. *FAO*, 22/1, 100 p. <https://www.fao.org/3/ap353s/ap353s.pdf>
- Calama R., Sánchez-González M., Garchi S., Ammari Y., Cañellas I., Sghaier T., 2012. Towards the sustainable management of Thuya (*Tetraclinis articulata* (Vahl.) Mast.) forests in Tunisia: models for main tree attributes. *Forest Systems*, 21 (2): 210-217. <http://dx.doi.org/10.5424/fs/2012212-02532>
- Cao Q. V., Burkhardt H. E., 1980. Cubic-foot volume of loblolly pine to any height limit. *Southern Journal of Applied Forestry*, 4: 166-168. <https://doi.org/10.1093/sjaf/4.4.166>
- Crecente-Campo F., Rojo Alboreca A., Diéguez-Aranda U., 2009. A merchantable volume system for *Pinus sylvestris* L. in the major mountain ranges of Spain. *Annals of Forest Science*, 66: 808-808. <https://doi.org/10.1051/forest/2009078>
- Deleuze C., Morneau F., Renaud J. P., Vivien Y., Rivoire M., Santenoise P., et al., 2014. Estimer le volume total d'un arbre, quelles que soient l'essence, la taille, la sylviculture, la station. *Rendez-vous Techniques ONF*, 22-32. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01143797>
- DGF, 1995. Résultats du premier inventaire forestier national en Tunisie. *Ministère de l'Agriculture, Tunisie*, 88 p.
- Diéguez-Aranda U., Grandas-Arias J. A., Alvarez-Gonzalez J. G., Gadow K. V., 2006. Site quality curves for Birch Stands in North-Western Spain. *Silva Fennica*, 40 (4): 631-644. <http://dx.doi.org/10.14214/sf.319>
- Doyog N. D., Lee Y. J., Lee S. 2017. Stem taper equation analysis for *Larix kaempferi* species in the Central Region of South Korea. *Journal of Sustainable Forestry*, 36 (8): 747-63. <https://doi.org/10.1080/10549811.2017.1356737>
- Draper N. R., Smith H., 1981. *Applied regression analysis*. Wiley, 709 p.
- Fonweban J. N., Houllier F., 1997. Tarifs de cubage et fonctions de défilement pour *Eucalyptus saligna* au Cameroun. *Annals of Forest Science*, 54 : 513-528. <https://doi.org/10.1051/forest:19970602>
- Furnival G. M., 1961. An index for comparing equations used in constructing volume tables. *Forest Science*, 7: 337-341.
- Freire J., Tomé M., Tavares M., 2003. Equação de Volume Local para a *Pinus pinaster* Aiton na Serra da Lousã. *Silva Lusitana*, 11 (2): 207-215. [https://www.researchgate.net/publication/238096570\\_Equacao\\_de\\_Volume\\_Local\\_para\\_a\\_Pinus\\_pinaster\\_Aiton\\_na\\_Serra\\_da\\_Lousa](https://www.researchgate.net/publication/238096570_Equacao_de_Volume_Local_para_a_Pinus_pinaster_Aiton_na_Serra_da_Lousa)
- Goubi M., Bentouati A., Kherchouche D., Sghaier T., 2019. Tarifs et tables de cubage d'arbres individuels du pin d'Alep, *Pinus halepensis* Mill., dans l'Aurès algérien. *Bois et Forêts des Tropiques*, 339 : 45-59. <https://doi.org/10.19182/bft2019.339.a31715>

- Harvey A. C., 1976. Estimating regression models with multiplicative heteroscedasticity. *Econometrica*, 44: 461-465.
- Heidarsson L., Pukkala T., 2011. Taper functions for lodgepole pine (*Pinus contorta*) and Siberian larch (*Larix sibirica*) in Iceland. *Icelandic Agricultural Sciences*, 24: 3-11. [https://www.researchgate.net/publication/267946569\\_Taper\\_functions\\_for\\_lodgepole\\_pine\\_Pinus\\_contorta\\_and\\_Siberian\\_larch\\_Larix\\_sibirica\\_in\\_Iceland](https://www.researchgate.net/publication/267946569_Taper_functions_for_lodgepole_pine_Pinus_contorta_and_Siberian_larch_Larix_sibirica_in_Iceland)
- Hjelm B., 2013. Stem taper equations for poplars growing on farmland in Sweden. *Journal of Forestry Research*, 24: 15-22. <https://doi.org/10.1007/s11676-012-0270-4>
- Kitikidou K., Milios E., Radoglou K., 2017. Single-entry volume table for *Pinus brutia* in a planted peri-urban forest. *Annals of Silvicultural Research*, 41 (2): 74-79. <http://dx.doi.org/10.12899/asr-1437>
- Lumbres R. I. C., Abino A. C., Pampolina N. M., Calora F. G., Lee Y. J., 2016. Comparison of stem taper models for the four tropical tree species in Mount Makiling, Philippines. *Journal of Mountain Science*, 13: 536-545. <https://doi.org/10.1007/s11629-015-3546-2>
- Morice E., Chartier F., 1954. Méthode statistique. T. 1 : Élaboration des statistiques. T. 2 : Analyse statistique [comptendu] (2<sup>ème</sup> vol.). Paris, Imprimerie Nationale, 187 p. et 555 p.
- Pépinières de l'Atlantique, 2023. Pin maritime. Site web. <https://www.pepinieres-atlantique-mercier.com/nos-arbres/coniferes/pin-maritime/>
- Özçelik R., Crecente-Campo F., 2016. Stem taper equations for estimating merchantable volume of Lebanon cedar trees in the Taurus Mountains, Southern Turkey. *Forest Science*, 62: 78-91. <https://doi.org/10.5849/forsci.14-212>
- Özçelik R., Göçeri M. F., 2015. Compatible merchantable stem volume and taper equations for eucalyptus plantations in the Eastern Mediterranean Region of Turkey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 39: 851-863. <https://journals.tubitak.gov.tr/cgi/viewcontent.cgi?article=1387&context=agriculture>
- Palm R., 1988. Les critères de validation des équations de régression linéaire. Notes de statistique et d'informatique, Faculté des Sciences Agronomique de Gembloux, 27 p. <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/113726/1/88-1-Crit-ValidEqRégLin.pdf>
- Palm R., 1986. Étude des résidus de régression : principes et application. Notes de statistique et d'informatique, Faculté des Sciences Agronomique de Gembloux, 13 p.
- Palm R., 1981. Calcul et choix des équations de cubage d'arbres. *Bulletin de la Recherche Agronomique de Gembloux*, 16 (4) : 351-370.
- Pardé J., Bouchon J., 1988. Dendrométrie (2<sup>ème</sup> éd.). École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Nancy, 328 p.
- Parresol B. R., 1993. Modeling multiplicative error variance: An example predicting tree diameter from stump dimensions in baldcypress. *Forest Science*, 39 (4): 670-679. <https://academic.oup.com/forestscience/article-abstract/39/4/670/4627169>
- Prégent G., Savard F., Désaulniers G., 2001. Tarif de cubage à diamètre et hauteur variables d'utilisation pour le pin gris en plantation au Québec. Forêt Québec – Direction de la recherche forestière, Mémoire de recherche forestière, n° 139, 42 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/nos-publications/tarif-cubage-diametre-longueur-variables/>
- Rondeux J., 1993. La mesure des arbres et des peuplements forestiers. Les presses agronomiques de Gembloux, 521 p.
- Ryan T. A., Joiner B. L., 1976. Normal probability plots and tests for normality. Pennsylvania State University, 12 p. <https://www.additive-net.de/de/component/jdownloads/send/70-support/236-normal-probability-plots-and-tests-for-normality-thomas-a-ryan-jr-bryan-l-joiner>
- Sagvan M. H., Shamsudin I., Khalid R. H., Kamziah B. K., 2018. Development of Volume Function for Final Felling of *Pinus brutia* Ten in Kurdistan Iraq. *Environmental Analyses and Ecological Studies (EAES)*, 3 (1): EAES.000554.2018. <http://dx.doi.org/10.31031/eaes.2018.03.000554>
- Sánchez-González M., Tomé M., Montero G., 2005. Modelling height and diameter growth of dominant cork oak trees in Spain. *Annals of Forest Science*, 62: 633-643. <https://doi.org/10.1051/forest:2005065>
- Sánchez-González M., Cañellas I., Montero G., 2007. Generalized height-diameter and crown diameter prediction models for cork oak forests in Spain. *Investigación agraria. Forest System*, 16: 76-88. <https://fs.revistas.csic.es/index.php/fs/article/view/999>
- SAS Institute Inc., 2004. SAS/ETS 9.1 User's Guide. SAS Institute Inc, Cary, NC, 2436 p. [https://support.sas.com/documentation/onlinedoc/91pdf/sasdoc\\_91/ets\\_ug\\_7314.pdf](https://support.sas.com/documentation/onlinedoc/91pdf/sasdoc_91/ets_ug_7314.pdf)
- Selmi M., 1985. Différenciation des sols et fonctionnement des écosystèmes sur grès numidien de Kroumirie (Tunisie). Écologie de la subéraie zenaie. Thèse de doctorat des sciences naturelles, Université de Nancy I, 200 p.
- Sghaier T., Ben Abdallah M. A., 2022. Modélisation de la biomasse aérienne et construction d'un diagramme de gestion de densité d'un jeune peuplement en mélange de pin pignon (*Pinus pinea* L.) et de pin maritime (*Pinus pinaster* Soland) dans le Nord-Ouest de la Tunisie. *Revue Internationale GEO-ECO-TROP*, 46 (1) : 63-93. [https://www.geoecotrop.be/uploads/publications/pub\\_461\\_05.pdf](https://www.geoecotrop.be/uploads/publications/pub_461_05.pdf)
- Sghaier T., Ammari Y., 2022. Ajustement d'un système d'équations de volumes marchands pour le chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd.) en Tunisie. *Bois et Forêts des Tropiques*, 354 : 19-39. <https://doi.org/10.19182/bft2022.354.a36817>
- Sghaier T., Garchi S., Aziz T., 2020. Modélisation de la croissance et de la production du liège en Tunisie. *Bois et Forêts des Tropiques*, 346 (4) : 1-20. <https://doi.org/10.19182/bft2020.346.a31805>
- Sghaier T., Claustriax J. J., Ammari Y., Othmani H., 2019. Effect of the substrates used for forest seedlings production on the survival and growth of trees in a reforestation site in North-West of Tunisia. *Revue Internationale Geo-Eco-Trop*, 43 (1): 145-160. [https://www.geoecotrop.be/uploads/publications/pub\\_431\\_11.pdf](https://www.geoecotrop.be/uploads/publications/pub_431_11.pdf)

Sghaier T., Sánchez-González M., Garchi S., Ammari Y., Cañellas I., Calama R., 2015. Developing a stand-based growth and yield model for Thuya (*Tetraclinis articulata* (Vahl) Mast) in Tunisia. *iForest*, 9: 79-88. <https://doi.org/10.3832/IFOR1389-008>

Sghaier T., Garchi S., Ammari Y., 2013. Tables de cubage pour les plantations du pin pignon (*Pinus pinea*) du Nord-Ouest de la Tunisie. *Annales de la Recherche Forestière au Maroc*, 42 : 157-170. <https://www.researchgate.net/publication/275031477> [Tables de cubage pour les plantations du pin pignon Pinus pinea du Nord-Ouest de la Tunisie](https://www.researchgate.net/publication/275031477)

Sghaier T., Ammari Y., Garchi S., 2008. Étude et choix d'équations de cubage d'arbres pour le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Tunisie. *Revue de l'INAT*, 23 (2) : 199-225. <https://www.researchgate.net/publication/259286015> [ETUDE ET CHOIX D'ÉQUATIONS DE CUBAGE D'ARBRES POUR LE PIN D'ALEP Pinus halepensis Mill EN TUNISIE](https://www.researchgate.net/publication/259286015)

Shahzad M. K., Hussain A., Burkhart H. E., Li F., Jiang L., 2020. Stem taper functions for *Betula platyphylla* in the Daxing'an Mountains, northeast China. *Journal of Forestry Research*, 32: 529-541. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01152-4>

Shaïek O., Loustau D., Garchi S., Bachtobji B., El Aouni M. H., 2010. Estimation allométrique de la biomasse du pin maritime en dune littorale : cas de la forêt de Rimel (Tunisie). *Forêt Méditerranéenne*, tome XXXI (3) : 231-242.

Tang C., Wang C. S., Pang S. J., Zhao Z. G., Guo J. J., Lei Y. C., et al., 2017. Stem taper equations for *Betula alnoides* in South China. *Journal of Tropical Forest Science*, 29: 80-92. <https://www.researchgate.net/publication/312069493> [Stem taper equations for Betula alnoides in South China](https://www.researchgate.net/publication/312069493)

Tasissa G., Burkhart H. E., Amatesi R. L., 1997. Volume and taper equations for thinned and unthinned loblolly pine trees in Cutover, site-prepared plantations. *Southern Journal of Applied Forestry*, 21 (3): 146-152. <https://doi.org/10.1093/sjaf/21.3.146>

Thibaut A., Rondeux J., Claessens H., 1998. Tarifs de cubage pour l'aulne glutineux (*Alnus glutinosa* L. Gaertn.) en Belgique méridionale. *Revue Forestière Française*, 50 (3) : 244-250. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03443633/document>

Thill A., Palm R., 1979. Étude dendrométrique des chênes indigènes (*Quercus robur* L. et *Quercus petraea* (Mttuschka) Lieblein). *Bulletin de la Recherche Agronomique de Gembloux*, 14 (3-4) : 267-284. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/117068>

Tomé M., Patrício M. S., Monteiro M. L., 2005. Biomass Equations for *Castanea sativa* High Forest in the Northwest of Portugal. *Proceedings of the III International Chestnut Congress*, Abreu C. G., Rosa E., Monteiro A. A. (eds). ISHS, *Acta Horticulturae*, 693. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.693.98>

Tran-Ha M., Perrotte G., Cordonnier T., Duplat P., 2007. Volume tige d'un arbre ou d'une collection d'arbres pour six essences principales en France. *Revue forestière française*, vol. LIX (6) : 609-624. <https://hal.science/hal-03449676/document>

Vallet P., Dhôte J. F., Le Moguédec G., Ravart M., Pignard G., 2006. Development of total aboveground volume equations for seven important forest tree species in France. *Forest Ecology and Management*, 229 (1-3): 98-110. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.03.013>

Van Deusen P. C., Sullivan A. D., Matney T. G., 1981. A prediction system for cubic foot volume of loblolly pine applicable through much of its range. *Southern Journal of Applied Forestry*, 186-189. <https://doi.org/10.1093/sjaf/5.4.186>

Yousefpour M., Fadaie Khoshkebijary F., Fallah A., Naghavi F., 2012. Volume equation and volume table of *Pinus pinaster* Ait. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, 3 (5): 1072-1076. <https://www.researchgate.net/publication/309418719>

Zheng C., Mason E. G., Jia L., Wei S., Sun C., Duan J., 2015. A single-tree additive biomass model of *Quercus variabilis* Blume forests in North China. *Trees*, 29: 705-716. <https://www.researchgate.net/publication/270892733> [A single-tree additive biomass model of Quercus variabilis Blume forests in North China](https://www.researchgate.net/publication/270892733)

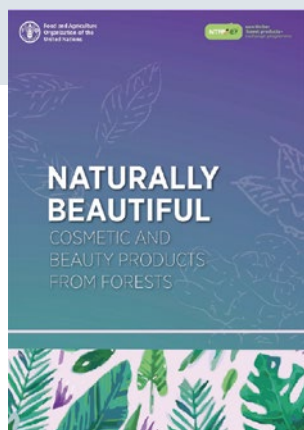
### Essoussi et al. – Déclaration de contribution des auteurs du crédit

Rôle du contributeur	Noms des auteurs
Conceptualisation	T. Sghaier
Gestion des données	T. Sghaier, I. Essoussi
Analyse formelle	T. Sghaier, I. Essoussi
Acquisition du financement	INRGREF
Enquête et investigation	T. Sghaier, I. Essoussi
Méthodologie	T. Sghaier, I. Essoussi
Gestion de projet	T. Sghaier
Ressources	INRGREF
Logiciels	T. Sghaier, I. Essoussi
Supervision	T. Sghaier
Validation	I. Essoussi, T. Sghaier
Visualisation	T. Sghaier, I. Essoussi
Écriture – Préparation de l'ébauche originale	I. Essoussi, T. Sghaier
Écriture – Révision et édition	T. Sghaier, I. Essoussi

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](mailto:bft@cirad.fr) - ISSN : L-0006-579X



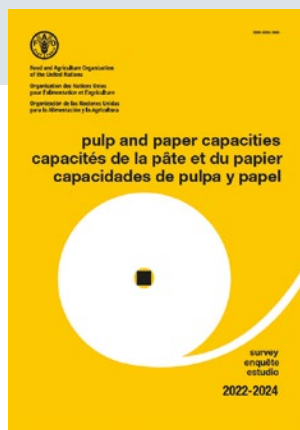
FAO AND NON-TIMBER FOREST PRODUCTS-EXCHANGE PROGRAM, 2020. **NATURALLY BEAUTIFUL: COSMETIC AND BEAUTY PRODUCTS FROM FORESTS.** THAILAND, FAO, 186 P.

During the last decade or so the extent of natural ingredients used by the cosmetics industry has increased, but there is no comprehensive publication on beauty products based on forest products, although scattered information does exist. By bringing attention to the role of forests in supplying beauty products and the connections with livelihood security and utilization of NWFPs, awareness of the importance of forests and their connection with cosmetics will be raised. Within this context, FAO and the Non-Timber Forest Products-Exchange Program (NTFP-EP) Asia have conducted this regional assessment of NWFPs related to the cosmetics and fragrance sector. The study compiled a set of case studies that examined specific NWFPs and the various traditional contexts in which they are collected, processed and marketed. The main objective of this volume is to present the case studies and the emerging synthesis, while encouraging cross-sectoral discussions in Asia on forests and beauty products. The study also provides recommendations on further enhancing equitable arrangements between forest communities and industry players. The initiative also organized a mini-seminar on forest product contributions to the cosmetics industry as part of the Asia-Pacific Forestry Week 2016 in Clark, Pampanga, the Philippines.

*Abstract adapted from the publisher's abstract.*

FAO and Non-Timber Forest Products-Exchange Programme, Viale delle Terme di Caracalla, 00153 Rome, Italia.

To download: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/ca8590en>



FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2023. **PULP AND PAPER CAPACITIES, SURVEY 2022-2024.** ITALIA, FAO, 114 P.

The annual FAO survey of global pulp and paper capacities is based on data received from correspondents. The survey provides statistics on pulp and paper production capacity along with short-term production capacity forecasts. It also presents statistics on pulp and paper production and information about the utilization of recovered paper.

*Abstract adapted from the publisher's abstract.*

FAO, Viale delle Terme di Caracalla, 00153 Rome, Italia.

To download: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cc7461t>



ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE, 2024. **LA DURABILITÉ EN CHIFFRES – LES PRODUITS FORESTIERS À LA FAO.** ITALIE, FAO, 52 P.

Tant que les modes de production et le commerce des produits forestiers resteront méconnus et ne seront pas évalués de manière adéquate, il nous sera impossible de bâtir la bioéconomie transparente et dynamique dont la planète a besoin pour prospérer. Les données relatives aux produits forestiers sont essentielles pour suivre les incidences et les innovations dans l'industrie mondiale du bois, lutter contre le changement climatique grâce au calcul des émissions de carbone et mettre au point des politiques équitables qui permettent de maintenir les services écosystémiques et de préserver les valeurs forestières indispensables aux populations. Autrement dit, les produits forestiers – et les données qui leur sont associées – constituent les piliers d'un avenir durable.

*Résumé adapté de celui de l'éditeur.*

FAO, Viale delle Terme di Caracalla, 00153 Rome, Italie.

À télécharger : <https://doi.org/10.4060/cc7561fr>

# Improving *Acacia* smallholder plantation value chains in Thừa Thiên Huế cooperative alliance, Vietnam

Thanh Ha Ho<sup>1</sup>  
Verina INGRAM<sup>2</sup>  
Seiji IWANAGA<sup>3</sup>  
Thi Thuy Minh NGUYỄN<sup>4</sup>

<sup>1</sup> University of Agriculture and Forestry  
Hue University  
102 Phung Hung, Hue  
Thua Thien Hue  
Vietnam

<sup>2</sup> Wageningen University and Research  
Wageningen Economic Research and Forest & Nature Conservation Policy Group  
PO Box 100, 6700AC  
Wageningen  
The Netherlands

<sup>3</sup> Forestry and Forest Products Research Institute  
Department of Forest Policy and Economics,  
1 Matsunosato, Tsukuba  
Ibaraki 305-8687  
Japan

<sup>4</sup> University of Agriculture and Forestry  
Hue University  
Centre for Climate Change Study in Central Vietnam  
102 Phung Hung, Hue  
Thua Thien Hue  
Vietnam

**Auteur correspondant / Corresponding author:**  
Verina INGRAM –  
[verina.ingram@wur.nl](mailto:verina.ingram@wur.nl)



## Photos 1.

*Acacia* plantations during the humid season (a), the drought season (b), and with the possibility of grazing cattle (c). The plantations are composed of young trees with small diameters.

Photos T. Ha Ho.

Doi : 10.19182/bft2024.359.a37090 – Droit d'auteur © 2024, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 23 décembre 2022 ; date d'acceptation : 10 novembre 2023 ; date de publication : 29 février 2024.



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

## Citer l'article / To cite the article

Ho T. H., Ingram V., Iwanaga S., Nguyễn T. T. M., 2024. Improving *Acacia* smallholder plantation value chains in Thừa Thiên Huế cooperative alliance, Vietnam. Bois et Forêts des Tropiques, 359 : 27-38. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2024.359.a37090>

## RÉSUMÉ

### Amélioration des chaînes de valeur pour les petites plantations d'*Acacia* dans le cadre de l'alliance coopérative de Thừa Thiên Huế, Vietnam

Les plantations d'*Acacia* au Vietnam jouent un rôle important dans l'approvisionnement de l'industrie de transformation du bois et la création de revenus pour les petits propriétaires forestiers. Cependant, il s'avère difficile d'améliorer leurs revenus et de réduire les vulnérabilités inhérentes aux systèmes de production actuels. Pour remédier à cette situation, une analyse quantitative et qualitative des chaînes de valeur a été entreprise pour comprendre les produits et les bénéfices des petites plantations d'*Acacia* dans la province de Thừa Thiên Huế au Vietnam. Les résultats montrent que les plantations d'*Acacia* sont rentables, ne nécessitent que peu d'intrants et ont une durée minimale de rotation de cinq ans seulement. Les coûts d'extraction et de transport représentent une part importante des coûts de production totaux. Les négociants ont un rôle important dans la mise en relation des producteurs et des transformateurs. La plupart des produits commercialisés sont des grumes d'*Acacia* destinées aux scieries pour déchetage et transformation en d'autres produits, et pour la production de bois de charpente et d'usage domestique. Les grumes d'*Acacia* d'un diamètre supérieur à 15 cm ont davantage de valeur ajoutée pour les entreprises de transformation du bois qui produisent des meubles destinés à l'exportation. Les vulnérabilités découlent de la chaîne de valeur très fragmentée, peu coordonnée et proposant peu de mécanismes d'échange d'informations, et des différends entre groupes ethniques qui suggèrent la nécessité d'intervenir sur les chaînes de valeur de manière culturellement sensible. Les différentes options pour augmenter les bénéfices – en particulier pour les petits propriétaires de plantations – comprennent la diversification des productions, l'intégration de la chaîne et une augmentation de la production pour une meilleure efficacité d'échelle.

**Mots-clés :** *Acacia*, petites plantations forestières, analyse des chaînes de valeur, certification volontaire de durabilité environnementale, coopérative, Vietnam.

## ABSTRACT

### Improving *Acacia* smallholder plantation value chains in Thừa Thiên Huế cooperative alliance, Vietnam

*Acacia* plantations in Vietnam have an important role in supplying the wood processing industry and generating income for small-scale forest owners. However, it is proving difficult to improve their incomes and reduce the vulnerabilities inherent to current production systems. To address this situation, a quantitative and qualitative value chain analysis was undertaken to understand the products and profits from small-scale *Acacia* plantations in Thừa Thiên Huế province in Vietnam. The results show that *Acacia* plantations are profitable, require low levels of inputs and have a short minimum rotation time of five years. Harvesting and transport costs account for a large proportion of total production costs. Traders play an important role in linking producers and processors. Most of the products traded are *Acacia* logs for chipping and processing into other products and for saw-wood to produce timber for carpentry and domestic uses. *Acacia* logs with larger diameters of over 15 cm have a higher added value for wood processing companies producing furniture for export. Vulnerabilities include the highly fragmented value chain with little coordination and few information exchange mechanisms, and differences between ethnic groups that suggest a need for culturally sensitive intervention on value chains. Different options to increase profits – particularly for smallholder plantation owners – include product diversification, chain integration, and increased production to achieve efficiencies of scale.

**Keywords:** *Acacia*, smallholder forest plantations, value chain analysis, voluntary sustainability certification, cooperative, Vietnam.

## RESUMEN

### Mejora de las cadenas de valor para plantaciones de *Acacia* de pequeños propietarios en la alianza cooperativa de Thừa Thiên Huế, en Vietnam

Las plantaciones de *Acacia* de Vietnam juegan un papel importante en el suministro a la industria de transformación de la madera y en la generación de ingresos para los pequeños propietarios forestales. Sin embargo, resulta difícil mejorar estos ingresos y reducir las vulnerabilidades inherentes a los sistemas de producción actuales. Con el objetivo de remediar esta situación, se emprende un análisis cualitativo y cuantitativo de la cadena de valor para comprender los productos y los beneficios de las pequeñas plantaciones de *Acacia* en la provincia de Thừa Thiên Huế, en Vietnam. Los resultados muestran que las plantaciones de *Acacia* son rentables, requieren bajos niveles de insumos y tienen un tiempo mínimo de rotación corto, de cinco años. Los costes de recolección y transporte representan una importante proporción de los costes totales de producción. Los comerciantes juegan un papel importante al poner en contacto a los productores con los transformadores de la madera. La mayor parte de los productos comercializados son troncos de *Acacia* para astillar y transformar en otros productos, y para producir madera aserrada para carpintería y usos domésticos. Los troncos de *Acacia* con diámetros grandes, de más de 15 cm, presentan un elevado valor añadido para las empresas transformadoras de madera que producen muebles destinados a la exportación. Entre las vulnerabilidades se encuentran la cadena de valor altamente fragmentada, con poca coordinación y pocos mecanismos de intercambio de información, y las diferencias entre grupos étnicos que aconsejan una intervención culturalmente sensible en las cadenas de valor. Las diferentes opciones para incrementar los beneficios – en especial para los propietarios de pequeñas plantaciones – incluyen la diversificación del producto, la integración de la cadena y un aumento de la producción para alcanzar mayor eficiencia de escala.

**Palabras clave:** *Acacia*, plantaciones forestales de pequeños propietarios, análisis de cadena de valor, certificación de sostenibilidad voluntaria, cooperativa, Vietnam.

## Introduction

Vietnam has become one of the major global woodchip exporters in the past 15 years. In 2002, the country exported approximately 150,000 tons of woodchips. By 2015, the export of woodchips, mainly from planted *Acacia* species (*Acacia mangium* and *Acacia* hybrids), reached 8.1 million tons (Phuc et al. 2013). *Acacia* species are preferred for woodchips due to their fast growth, rotation period, and higher profits compared to other tree species, including those in natural forests (Kien and Harwood 2017). About 80% of plantation woods are used for woodchips production (Maraseni et al. 2017). Up to the end of the 1990s, forested land in Vietnam was converted into agricultural land to cultivate rice, tea, or livestock. However, since around 2002, small-scale farmers have expanded the area of forest plantations, planting on previously deforested agricultural land (Sandewall et al. 2010). By 2014, 12.6 million ha (79.7%) of the total forestland have been allocated to individual households (4.4 million ha), government organizations including state forest enterprises (5.2 million ha), enterprises (2.2 million ha), and other entities including communes (0.8 million ha) (MONRE 2014). Government organizations largely manage special use and protection forests for conservation, with planted production forests mostly allocated to households and economic entities (Nguyen and Masuda 2018). By 2015, planted forests in Vietnam accounted for about 26% of the total forest area (Maraseni et al. 2017), with approximately 46% of that area managed by individual households and smallholders (Nambiar et al. 2015). The national forest development strategy to 2020 promoted the expansion of plantation forests coupled with third-party forest certification, including groups of smallholder farmers (Auer 2012). The forestland allocation policy has led to numerous small-scale farm forests being managed by ethnic minorities, reduced the area previously managed by state forest enterprises, and limited the availability of arable land in mountainous regions. To respond to this scarcity, under Decision 178/2001, the Ministry of Agriculture and Rural Development allowed barren forestland owners to use up to 20% of their allocated areas for agricultural annual crops (Nguyen and Masuda 2018). The national policies encouraging afforestation and timber promotion have also created employment, increased household income, and led to increased exports of plantation products, especially *Acacia*-based products (Auer 2012).

Small-scale plantations in tropical countries have generally been seen as a means of reducing illegal logging, meeting the fuelwood needs of the rural poor, reducing pressure on natural forests, thereby contributing to their conservation, and allowing local people to choose how they allocate land, capital, and time to growing trees (Harrison and Herbohn 2001). However, smallholder plantation forest owners face problems related to the temporality of employment, which only occurs during planting and harvesting; difficulties finding private and public investment capital to establish plantations; income returns occurring only after

harvest; and land tenure conflicts between the government, enterprises, indigenous people, and local people (Auer 2012; Cossalter and Pye-Smith 2003). Marketing timber from small-scale plantations can be difficult for smallholder owners due to their relative lack of power and market information, the small quantity of timber they offer, the low uniformity of products, and the continuity of supply (Auer 2012; Harrison and Herbohn 2001). Given the importance of smallholder *Acacia* plantations in supplying the Vietnamese processing industry and export markets, the problems faced by smallholders, and the lack of data on their options to improve their income and position in the value chain, this study seeks to fill this knowledge gap.

The majority of forested land in Vietnam is in the Northeast, North Central, and Central Highlands (MARD 2020). Thừa Thiên Huế is the southernmost province of the North Central Coast region, where 70% of the total land area of 505,398 ha is categorized as forest land, mainly in the mountainous western area, where socio-economic conditions have long been less developed (Minot 2006) and poverty affects 30% of households (Grimm et al. 2016). These highlands have been targeted by the government for social, economic, and environmental development, on the assumption that the forestland can be suitably and sustainably developed.

*Acacia* species have been increasingly planted throughout Thừa Thiên Huế province since 1998, when a 5 million ha programme was implemented (Ha 2008). By the end of 2019, the forest area of the province was 311,206 ha, of which 99,833 ha were plantation forests. Thừa Thiên Huế is among the provinces with the highest forest coverage in Vietnam. Plantation forests have increased the province's forest coverage from 43% in 2003 to 57.27% in 2019 (MARD 2020).

The majority of the population in the Highlands are ethnic minorities (Kozei 2014), who have different farming and cultural traditions related to land use than the Kinh (Viet) from the lowland coastal region, who comprised 85.3% of the national population in 2019 (GSO 2020). After the decollectivization of agriculture, communities were given household forest land use rights, where they have generally practiced subsistence agriculture (Minot et al. 2006; Castella et al. 2006). The Kinh have historically engaged in wet rice cultivation in plains areas, and ethnic minorities in shifting cultivation (Castella et al. 2006). Currently, *Acacia* products (woodchips and timber) provide the main source of income for many households in this area. However, smallholder *Acacia* plantation owners face difficulties in increasing their income due to a lack of knowledge of silviculture techniques, the value, and markets for *Acacia*-based products (Ha, 2008) (photos 1).

To overcome these problems, many smallholder plantation owners are members of cooperatives (Castella et al. 2006). The Vietnam Cooperative Alliance (VCA) (2019; 2020) is the non-governmental socio-economic organization at the

apex of the Vietnamese cooperative movement. The Thừa Thiên Huế Cooperative Alliance (TTHCA) is a member of the VCA. Established in 1994, it brings together 18,000 members of 256 farmer cooperatives in the province. Of these, about 5,000 farmers in 128 cooperatives are also plantation forest owners, owning on average two to three hectares (ranging from 0.3 to 30 ha). A total estimated 30,000 ha of forested land belongs to members and the cooperatives. Given increasing requirements for third-party sustainability certification, such as Forest Stewardship Certification (FSC) or the Program for the Endorsement of Forest Certification (PEFC), for timber destined for the export market, TTHCA and its members risk a reduction in income if they are uncertified and unable to sell to the lucrative certified export market (Maraseni et al. 2017; Hoang et al. 2019).

Given this context, the aim of this study is to understand the value chain flowing from TTHCA smallholder plantation owners from the production and trade of *Acacia*-based products, the economic costs and benefits in the chain, and the options to sustainably increase benefits, particularly for smallholder owners.

## Methods

A two-step value chain analysis (Kaplinsky and Morris 2001) was conducted. The first step was to determine the inputs and outputs of *Acacia* products and also to calculate the incremental value of each product by determining the value of their outputs. The value chains emerging from the plantations were then mapped, leading to the identification of two *Acacia* products (woodchip and timber for furniture), which were differentiated according to their diameter and uses (woodchips or timbers) (photos 2).

### Data collection

To ensure a representative sample and to strengthen the results, the Probability Proportional to Size method (Schmitz 2005) was applied. From the total target group of 256 cooperatives in TTHCA, three districts (Huong Thuy, Phong Dien, Phu Loc) were selected based on the criteria of their geography (flat, hilly, or mountainous) and distance from the factory (near and far) (table 1). These districts share similar soil characteristics, with the predominant soil type being Ferralsol, characterised by a medium to thin topsoil, uniform texture, and rocky, degraded, and low-quality soil. From each selected district, three cooperatives where at least 40% of members-owned plantations were selected. In each selected cooperative, 30 *Acacia* plantation-owning households were then randomly sampled for interviews. All households agreed to be interviewed. In total, 270 households (225 Kinh and 45 minority households) were interviewed in 2019 to obtain qualitative and quantitative data about their demographics, plantation production, harvesting, and transportation activities, costs and inputs, including own and hired labour, and income for the years 2016 and 2017. Following the value chain, using snowball sampling methods, 20 traders buying *Acacia* wood products, 15 sawmill owners, 22 carpenters, 5 woodchip mills, and 2 large processing companies in Thừa Thiên Huế province were identified and interviewed. These interviews covered demand, production capacity, values, and the volume of wood processed in Thừa Thiên Huế province. A focus group discussion with invited farmers, traders, processors, and exporters yielded information to verify and cross-check individual interview data and deepen understanding of the value chain activities and actors. Data on exporters and their customers were not included in the scope due to accessibility limitations.



**Photos 2.**

Carpentry and joinery factory using big timber for furniture (a) and woodchip factory using small timber (b), the main processors of the wood raw material.  
Photos T. Ha Ho.



### Data analysis

Qualitative information from surveys was synthesized to determine some factors affecting the production process and to investigate interrelations between components in the value chain of production of *Acacia* products and analysed using basic production to describe the current situation.

Quantitative data were analysed and processed using SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) and EXCEL software to describe differences between factors and to assess economic indicators of production and consumption.

**Table I.**  
 Characteristics of selected districts and cooperatives.

District	Situation	Cooperative/Commune
Huong Thuy	Flat	Thuy Phuong
	Good transport conditions	Phu Bai/ Thuy Phu
	Close to furniture factories	Thuy Phu/ Thuy Phu
Phong Dien	Flat and hilly	Hoa My/ Phong My
	Poor transportation access	Phong Son
	Far from factories	Phong Chuong
Phu Loc	Hilly and mountainous	Loc Tri
	Poor transport access	Loc Tien
	Close to woodchip factories	Loc Hoa

Comparisons of Kinh and indigenous householder plantation owner members of the Thừa Thiên Huế Cooperative Alliance (TTHCA) were made using common economic indicators: total cost, total income, net income, net present value (NPV), profit (gross margin, difference between total income and total costs), the cost-benefit ratio (CBR), and internal rate of return (IRR). Economic efficiency is measured using cost-benefit analysis (CBA) using three indicators: net present value (NPV), internal rate of return rate (IRR) and the benefit cost ratio (BCR). Data are provided in Vietnamese Dong (VND). According to the State Bank of Vietnam, the average exchange rate at December 2019 was 1 US\$ = 23,160 VND.

## Results

### Value chain activities and actors, costs and benefits

The qualitative and quantitative data are presented, which describe the *Acacia* value chain actors, activities and products, and associated costs and benefits of activities.

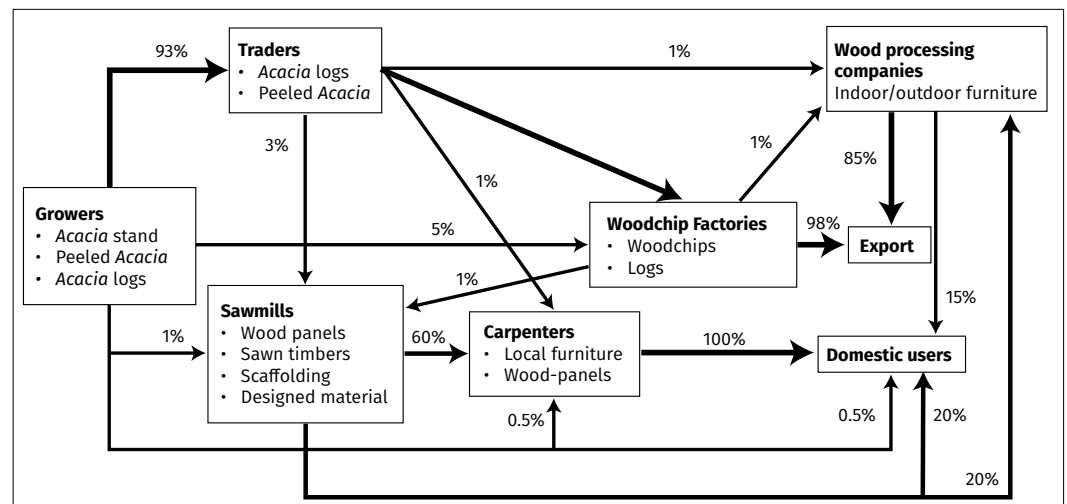
### The *Acacia* product value chain from Thừa Thiên Huế province

Figure 1 highlights that the *Acacia* value chain segments are distinguished according to tree diameter, and then used for two main products: furniture and woodchips. Eight types of actors engage in this chain.

Traders (93%) and woodchip processing companies (5%) together consume an estimated 98% of standing *Acacia* and peeled *Acacia* logs supplied by growers, giving them a strong position of power in determining the subsequent products and prices (photos 3). Data on the total volume of products further down the chain from processing companies and carpenters could not be estimated because of the diversity of products, large numbers of actors, and small production volumes. The nature of the chain is highly fragmented (Los et al. 2015) with little integration and specialization by different actors in different activities. Smallholders capture limited value as they are not involved in adding value in segments such as trading, processing, milling, or carpentry. There is little coordination and information exchange between actors along the chain in terms of quality, technical specifications, forward planning for demand, investment, credit, or input supply.

### Smallholder *Acacia* farmers

On average, the TTHCA *Acacia* farmers own 2.5 ha of *Acacia* plantations per household, ranging from 0.3 ha to 30 ha, with a standard deviation of 0.28. Most farmers



**Figure 1.** Actors and position in the *Acacia* value chain from Thừa Thiên Huế province key: % indicates the percentage each actor supplies to the total value chain.

planted *Acacia* because of its high perceived profit (98%), low cost (93%), available market (90%), simple production techniques (61%), short production cycle (60%), suitable soil condition (30%), and to aid soil improvement (17%). This indicates that farmers were more concerned with short-term profitability than soil fertility, a motivation to plant *Acacia* often promoted by scientists (Nambiar et al. 2015), representing an aspect that appears less understood by farmers. None of the interviewed farmers or cooperatives had third-party sustainability certification, although there were about 5,000 ha of plantation forests in the province certified by FSC in 2019.

Farmers generally sell to traders (93%) and woodchip factories (5%), with sawmills, carpenters, and local users together accounting for 2%. All (100%) of the minority households sold their forest stands to traders; however, some Kinh householders conduct harvest and transport to sell *Acacia* logs to woodchip factories or sawmills. Mainly standing *Acacia* trees and peeled *Acacia* logs are sold to traders, with large diameter *Acacia* logs sold to sawmills or carpenters. A small percentage (0.5%) of residual products (such as bark and small diameter branches) are used as firewood or sold to local users.

### Traders

About 93% of *Acacia* products traded by the cooperative members in the province are sold to traders. The average investment capital of traders was about 180 million VND, which purchased about 3 hectares of standing *Acacia*. Capital sources for traders varied and included own capital (80%), bank loans (15%), and friends (5%). *Acacia* stands were the main product purchased by traders. *Acacia* stands were preferred to logs and other species for a number of reasons. Unlike the strongly regulated timber species in protection and conservation forests, *Acacia* is classified as a production forest product and can be legally harvested, easing business and its legitimacy, which is a major factor for traders entering the forestry trade. Compared to other timbers, *Acacia* wood is generally sold in shorter cuts (from 1-3 meters long). This makes it easy to handle and transport.

Traders largely sell debarked, peeled *Acacia* logs (95%) or unpeeled *Acacia* logs (5%). Peeled *Acacia* was sold only to woodchip factories, whereas unpeeled logs had a larger market, and were sold to sawmills, carpenters, and wood processing companies for indoor or outdoor furniture and other consumer end-use products.

### Woodchip and wood processing companies

The five woodchip mills and two wood processing companies surveyed in the province were joint-stock companies or joint ventures with foreign capital. Traders are the biggest source of timber (95%) for woodchip factories. The factories buy about 5% of their *Acacia* supplies directly from farmers. *Acacia* grown in other

provinces is also sold to these factories through traders. Woodchip factories buy only peeled *Acacia* by the ton. The main output product (98%) is woodchip exported internationally, mainly to China, Thailand, Japan, and South Korea.



**Photos 3.**

Peeling of *Acacia* trunks (a, c) after the logging as short logs (b), stocked on the parcel edge.

Photos T. Ha Ho.

About 2% of large-diameter, peeled *Acacia* logs are resold to sawmills or wood processing companies for furniture or other end-use products.

Demand from the large and open export market for *Acacia* chips in Asia and government policies have been decisive factors in the success of these companies. Prior to 2019, these companies received incentives from the government and support from policies, such that all products from production forests were exempt from export taxes. Compared to other timber species, *Acacia* plantations have been well supported by the Vietnam government and foreign investment projects, creating the current large supply of raw materials. Since the technical requirements for *Acacia* chip production are not very complex, production is suitable for unskilled workers, the majority of whom are local farmers. In contrast, the technical and procedural requirements for certified logs are more complex and costly.

Indoor and outdoor furniture companies purchase *Acacia* logs from woodchip factories, traders, and especially from sawmills, where they order pre-cut material. The majority of their purchases is processed timber, with raw or semi-processed material accounting for only a very small proportion of purchases (10%). The main export markets for 85% of total products are European Union countries and the USA, with 15% of products sold domestically.

### Sawmills and carpenters

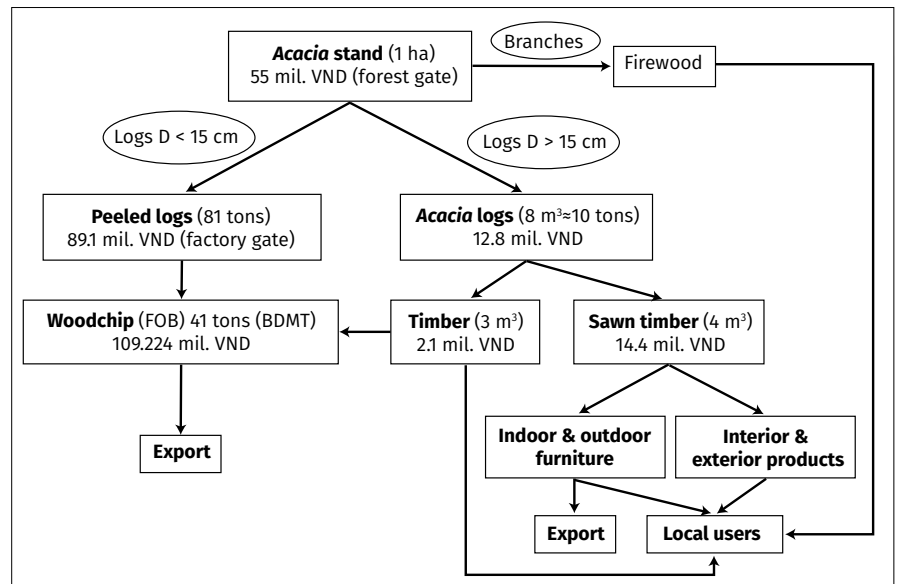
Sawmills and carpentry workshops are located in almost every district in the province. However, official information on their numbers and trade is not available. They are supplied with timber from *Acacia* farmers and traders. Sawmill final products include sawn boards sold to carpenters, scaffolding for use in conventional construction, and packaging materials for factory and company goods and supplies. 60% of sawmill products are sold to carpenters, who sell their popular and diverse end products, such as home furnishings, doors, and furniture, all to local users.

### Added value channels for *Acacia* products

There are two main channels where added value is accrued in the *Acacia* value chain from Thừa Thiên Huế province, distinguished by the size of *Acacia* logs and resulting processing as woodchips or furniture. These channels are not independent but interrelated by different log diameters, which are used for different purposes and products. The log diameter is determined by the age and silvicultural management of the plantation. To better understand the profitability of each product type and chain actor, the added value of each segment in the value chain is calculated on a per hectare basis. In one hectare of five-year-old *Acacia* plantation, approximately 5% to 10% have a diameter greater than 15 cm, which is used for timber, and the rest (90%) is used for wood chips. The incremental value at each stage is shown in figure 2.

Channel 1 and 2 both start with *Acacia* logs with a diameter greater than 15 cm and involve the same actors in product processing. The difference is between the end users. On average, about 5 to 10% of the *Acacia* volume harvested is 15 cm diameter or more (about 8 m<sup>3</sup>/ha), which is usually sold to sawmills. Sawmills indicate that from 1 m<sup>3</sup> of *Acacia* logs, they produce 0.5 m<sup>3</sup> of sawn timber, 0.375 m<sup>3</sup> of offcut material, and the remaining 0.125 m<sup>3</sup> is comprised of sawdust and other defective materials. *Acacia* logs are purchased for about 1.6 million VND/m<sup>3</sup>. Sawn timber is sold at 3.6 million VND/m<sup>3</sup> in 2019, and offcut material for 700,000 VND/m<sup>3</sup>. Offcuts are often sold to local users as firewood or sold to factories to make woodchips. Sawn timber is sold directly to carpenters or interior and exterior woodworking companies for further processing. Products made by carpenters are sold to local users, while around 85% of interior and exterior wood products made by woodworking companies are exported, and 15% are sold to local consumers. Sawdust is often used as firewood or is disposed of as waste because the size of most sawmills and carpentry shops is too small to economically make products from sawdust.

Channel 3 commences with *Acacia* timber of less than 15 cm diameter. The trunk is cut into 2-meter-long pieces and peeled, after which it is sold directly to woodchip mills for export. Woodchip mills have a processing loss of 0.9%, of which 0.8% is in the form of sawdust, which can be sold for heating or to medium-density fiberboard (MDF) factories. Therefore, the total loss from processing is 0.1%. Woodchips are not dried prior to export, but the sale price is based on dry woodchips. The moisture content of wood chips largely depends on tree age and tree size, on average being 48 to 50% fresh weight. Wood moisture content is checked by random sampling by Vinacontrol, so that the total volume of absolute dry wood for a shipment can be calculated. A ton of *Acacia* wood chips was sold on average for 120 US\$ or 2,779,200 million VND/BDMT (bone dry metric ton) in 2019 at the port of exit (FOB) price.



**Figure 2.** Value adding in the *Acacia* value chain from Thừa Thiên Huế province.

### Costs and benefits of *Acacia* plantations for owners

*Acacia* is the main tree species (95% to 97%) planted by TTHCA members. The costs of production are strongly affected by the rotation cycle, which depends on the purpose of the plantation. *Acacia* was planted by 90% of members intended for woodchips on a production rotation cycle averaging five years. Factors affecting costs are the different farming habits of Kinh and minority householders. Kinh householders practice intensive plantation cultivation, where land is prepared carefully and fertilizer applied in the first two years, while the minority group householders generally practice extensive cultivation with trees planted in a hole and no or little fertilizer application. Seven main activities occur in the production cycle, as indicated in table II, along with their costs.

Although there is little difference in the total costs of *Acacia* plantations between Kinh and minority householders, there is a large difference in the costs of each plantation activity. In general, Kinh householders had higher costs for fertilizers (applied in the first 3 years), land preparation and protection (forest fire prevention and fighting, thinning and weeding, and pest management), and lower costs for harvesting and transportation. These differences are attributed to Kinh householders generally being closer to main roads and their plantations being more accessible, with less steep slopes than those owned by minority households. Harvesting and transportation costs are the highest costs incurred, accounting for 57% to 70% of total costs. On average, the costs of harvesting each hectare of *Acacia* are between 10 and 23 million VND, on average 16,700 VND/m<sup>2</sup> (0.72 US\$/m<sup>2</sup>); and between 5 and 10 million VND, on average 9,000 VND/m<sup>2</sup> (0.39 US\$/m<sup>2</sup>) for transportation for Kinh householders, but for minority households, the costs for harvesting are between 12 and 25 million VND, on average 18,700 VND/m<sup>2</sup> (0.81 US\$/m<sup>2</sup>) and transportation costs are between 8 and 15 million VND, on average 11,700 VND/m<sup>2</sup> (0.51 US\$/m<sup>2</sup>). The costs vary depending on the loca-

tion of the plantation. Consequently, most minority group households do not usually conduct harvesting and transportation but sell standing trees to traders, who harvest and transport them to mills and carpenters. All the costs are deducted from the buying price, which reduces the profitability of the plantations for owners.

The economic indicators of *Acacia* production for TTHCA householders are shown in table III. In general, *Acacia* plantations have high economic efficiency. Kinh householders earn higher profits compared to minority householders. As costs for both groups are similar, the main explanation for the higher profit is the higher volume of *Acacia* products sold. Productivity in the intensive production method favoured by Kinh households entails fertilizer application and silviculture techniques; the extensive method used by minority households depends strongly on the availability of land and other natural resources to maintain soil fertility. These findings suggest an intensive cultivation model is more economically profitable given the current limited availability of land for plantations. This finding also suggests that minority households, because of the extensive cultivation method generally practiced as a cultural habit, create a financial disadvantage.

## Discussion

A major finding is that the intensive plantation model favoured by Kinh households produces the highest net income for smallholder owner members of the TTHCA. However, based on the value chain analysis, changing production systems presents one option for households to increase income and profits. For households with insufficient investment capital, a semi-intensive model before transitioning to the intensive model could be used, where short-term intercropping of cassava, corn, legumes, etc., in the initial one to two years allows efficient land use, improves soil fertility, and provides an early income stream in the first years of afforestation – which can partly cover initial production costs. This agroforestry practice has been successfully applied in various provinces in Vietnam, including coconut-cacao intercropping in Ben Tre, litsea-cassava (*Litsea glutinosa* intercropped with *Manihot esculenta*) in Gia Lai, rubber-cassava (*Hevea brasiliensis* intercropped with *M. esculenta*) in Thừa Thiên Huế, and *Acacia*-cassava (*Acacia* sp. intercropped with *M. esculenta*) in Phu Tho (Mulia et al. 2018). Additionally, this recommendation is informed by experiences with agroforestry systems involving *Acacia* in other parts of the world (Deng et al. 2017; Lua et al. 2013; La et al. 2015). Other possibilities include capital assistance in tree growing and mainte-

**Table II.**

Average costs of *Acacia* plantation activities per hectare for Thừa Thiên Huế Cooperative Alliance (TTHCA) members in 2019.

Activity	Kinh households		Minority households		Average	
	Average	Standard error	Average	Standard error	Average	Standard error
Land preparation (labour)	2,850	320	2,250	640	2,750	373
Seedling purchase	2,250	640	3,510	820	2,460	670
Planting (labour)	1,250	225	1,650	725	1,317	308
Tree care and protection (labour)	6,200	1,250	2,800	1,150	5,633	1,233
Fertilizers	5,450	1,050	1,800	950	4,842	1,033
Harvesting (labour and materials)	16,700	6,250	18,700	6,750	17,033	6,333
Transportation	7,350	2,350	11,700	3,550	8,075	2,550
<b>Total</b>	<b>42,050</b>	<b>12,085</b>	<b>42,410</b>	<b>14,585</b>	<b>42,110</b>	<b>12,502</b>

nance and assistance in the period between planting and harvesting (Nawir et al. 2007). Changing to more intensive models, however, is anticipated to result in higher and more negative environmental impacts – such as the more intensive use of fertilizers impacting water and soil quality in ecologically fragile areas, the effects of clear-cutting land use cover on soil erosion, particularly on steep slopes, potential fire risks, and the introduction of monocultures reducing agricultural and forest biodiversity (Ingram et al. 2016). These costs were not quantitatively nor economically valued in this analysis but are critical to consider in terms of overall and landscape-scale costs and benefits. Following the practices embodied in sustainability certification schemes could partially mitigate these impacts (Auld et al. 2008; Iwanaga et al. 2019; RESOLVE Inc. 2012).

A second option to increase household income and profits is to use different *Acacia* subspecies. The use of hybrid clones could result in timber with a larger diameter compared to the current *Acacia* species (*A. auriculiformis* and *A. mangium*) given the same rotation period. This would increase the proportion of larger-diameter logs for saw logs, and the manufacture of indoor and outdoor furniture for domestic consumption and export, which is a more profitable segment of the chain. This would also be in line with the government's promotion of quality timber to meet its 2020 furniture export targets (Maraseni et al. 2017). To further improve income, trees should be grown for at least 6 years. Lee et al. (2022) indicate similar results given hybrids in stands of 7 years. Extension services are required to support the transition and adoption of enhanced silvicultural management techniques, greater risk tolerance, and longer timescales for returns on investment (Po et al. 2023).

Given the low level of coordination and information exchange, creating a barrier to align the demands for products with the smallholder supply of timber meeting specific technical and quality, a third opportunity is to structurally change activities in the chain. Common value chain upgrading strategies to do this are to shorten the chain and cut out intermediaries (Humphrey 2004). If households harvested, peeled, and sold directly to sawmills or processors (woodchip plants, furniture factories), they could capture

more value, manage costs themselves, and avoid intermediary costs. Investments in such expertise, training, and equipment are however generally needed to conduct these activities to meet customers technical and quality requirements (Humphrey and Schmitz 2000), particularly for sustainable certified timber, and extension services can aid the adoption of new practices (Po et al. 2023). The cooperative could play a key enabling role here. A side effect would be the exclusion of intermediaries from the chain, resulting in a loss of income for them.

A fourth alternative is to enhance the use of collective action and the power of cooperative members. Farmers could increase returns by selling residues to woodchip mills, particularly if they offer this collectively so that the larger volumes are more attractive to buyers, or by secondary processing, such as into briquettes for fuelwood, chipboard, laminate, etc. Agricultural and forestry extension services to cooperatives could be strengthened to provide supporting technical services, especially focusing on seedling quality, plantation maintenance, processing, and market information services. Collectively organised transport could lower costs, particularly for farmers further from customers and located on challenging terrain. Attention to the different practices and contexts of the different ethnic groups, and exchanges, could also enhance the benefits of minority owners. As access to land is a major limiting factor, especially for minority groups, policies that address this issue, while taking into account other land uses – notably maintaining food security and conservation of natural forests – could play a role in addressing inequalities in benefits gained by different ethnic groups in the *Acacia* value chain. As members of cooperatives, smallholders could relatively easily form labour exchange groups to aid land preparation, care, management, protection, harvest labour, and finance group transportation. This could reduce production costs, improve income and quality, and access to different markets for different products. Cooperatives with sufficient capital, technical knowledge, and management skills could also consider adding value to *Acacia* timbers and diversifying into processing products. Such groups could also be ways to exchange experiences on improved silviculture techniques such as thinning, fertilizer application, and insurance to cover the costs and risks of longer cycles (Maraseni et al. 2017) and to strengthen their negotiating position with mills and chip processing companies (Nawir et al. 2007).

Fifthly, collective action at other segments in the value chain could also result in efficiencies in scale and increase competitive advantage (Humphrey and Schmitz 2000). Where land conditions make harvesting difficult, traders could be organised to transport and sell peeled logs. Measuring and classifying large (over 15 cm) diameter logs targeted as timber for sawmills and wood processing factories would benefit both farmers and traders due to the higher value of large logs.

A sixth opportunity is to enhance links between stakeholders in smallholder chains to empower and enhance their position in the value chain (RTI, IIRR

**Table III.**

Economic indicators of *Acacia* production per hectare for Thừa Thiên Huế Cooperative Alliance (TTHCA) members.

Economic Indicators (1000 VND)	Kinh Households	Minority households	Average
Total cost over 5 years	42,050	42,410	42,110
Total income over 5 years	98,700	81,200	95,783
Profit (gross margin)	56,650	38,790	53,673
Net income from acacia per year	11,330	7,758	10,735
Net present value (NPV)	34,972	23,909	33,128
Benefit-cost ratio (BCR)	2.35	1.91	2.27
Internal rate of return (IRR)	47%	46%	46.5%

2012; Helmsing et al. 2011; Henriksen et al. 2010). Increased communication and improved information flow between the apex cooperative, the cooperatives and their members, sawmills, carpenters, and wood processing factories on their quality and diameter requirements and demand can result in more effective markets that also advantage smallholders. As the price for certified *Acacia* wood products is higher when exported for use in furniture, poles, boards, and planks in Europe and America, initiatives supporting smallholder group – certified sustainable forest management – can be beneficial for smallholders and others in the export chain (Hoang et al. 2015), as long as the full costs of certification are shared among stakeholders in the chain and not disproportionately borne by smallholders (Auer 2012; Hoang et al. 2015; Hoang et al. 2019). Apart from achieving higher value, stakeholders in the chain can benefit from the cooperation and information exchanges that commonly occur as part of certification (Ingram et al. 2016).

Seventh, the results suggest other upgrading strategies that improve efficiency, and add value by recycling and reusing waste could be explored. Currently, sawmills and paper mills are the main producers of residues, some of which are used as firewood. Sawdust and chips can be used in a variety of secondary products, such as MDF (medium-density fiberboard), fiber-, chip-, and particle-boards, laminates, pellets, and compressed sawdust briquettes (Wildayana 2016), paper, moulding, charcoal, household crafts (Dirkswager et al. 2011) and gums (Seigler 2002) to enhance returns and efficiency.

## Conclusion

*Acacia* is the most common and preferred species for smallholder landowners, producers, and traders, with The Thừa Thiên Huế Cooperative Alliance (TTHCA) member's *Acacia* plantations in Thừa Thiên Huế province, in Vietnam. *Acacia* plantations occupy 30,000 ha of forestland, equivalent to 29.8% of the planted forest area of the province. Smallholder farmers are generally highly dependent on their plantations, which generate 40% to 50% of household cash incomes, and *Acacia* plantations generate profits of on average 54.5 million Vietnamese Dong (VND, Vietnamese money) and an annual income of on average 10.9 million VND for rural cooperative members, with a positive cost-benefit ratio and high internal rates of return of between 45 and 50%. The costs of *Acacia* plantations can be recovered in a relatively short period of five years, and so they are favoured as the main land use and source of income by landowners in Thừa Thiên Huế province. The economic costs of intensive and extensively cultivated plantations are similar, with higher benefits related to increased productivity of intensive cultivated plantations.

The *Acacia* value chain originating from members of the TTHCA in Thừa Thiên Huế province has six main actors: smallholder farmers, traders, woodchip mills, wood processing factories, sawmills, and carpenters. The nature of the actors, the structure, organisation, and governance of the

value chain create vulnerabilities, particularly for smallholder owners. The chain is highly fragmented with little vertical integration, such that smallholder farmers are not involved in trading, processing, milling, or carpentry. Different land use practices and governance systems between ethnic minority and Kinh farmers suggest a need for culturally sensitive value chain interventions. There is little coordination, and information exchange enables demand and supply to be matched or communicates technical and quality requirements, such as sustainably produced timber and products, between actors along the chain. Traders play an important role in linking smallholders to wood processing plants where a variety of end-products, from chips to furniture, are produced, exported, and also sold on the Vietnamese domestic market, where most *Acacia* products are semi-finished. While demand for *Acacia* has grown, the growth rate to enable a continuing supply of the raw material is not known. Seven main options exist to address different activities and actors in the value chain. These include adding value for different actors along the chain, diversifying products and increasing production, and increasing the economic and environmental sustainability of the value chain for different actors, particularly small-scale owners and their cooperatives. However, to implement such options to enable sustainable and equitable value-adding, and to provide evidence for more effective policymaking, sharing information on not just economic costs and benefits for different actors but also on social and environmental implications is needed. Stakeholders in such decision making include the government, forest enterprises, cooperatives and their members, and certification standards organizations. Studies on the risks of high dependence on mono-species plantations from a livelihoods perspective – in terms of income but also energy, nutrition, and food security – and from an ecological viewpoint (such as risks of pests, diseases, and fire; impact on soil and water quality and on erosion on steep slopes) and possibilities to reduce risks and increase income, such as through diversification, as well as a comparative assessment of the environmental costs of intensive and extensive small-scale plantation forestry, are recommended.

### Funding

This research was supported by an Empowering Smallholder Farmers in Markets (ESFIM) grant from Wageningen Economic Research, Wageningen University and Research, and AgriCord in the Netherlands. We acknowledge the review of the draft paper conducted by Pr. Seiji Iwanaga, Department of Forest Policy and Economics, Forestry and Forest Products Research Institute, Japan.

### Availability of data and material

Data are available upon request.

### Ethics approval

All ethics requirements in Vietnam were complied with prior to the research. Consent to participate and consent for publication were obtained from all participants.

## References

- Amat J.-P., Bôi Phùng Tựu B. P. T., Robert A., Nghi Tran Hữu N. T. H., 2010. Can fast-growing species form high-quality forests in Vietnam, examples in Thừa Thiên Huế province? Bois et Forêts des Tropiques, 305: 67-76. <https://doi.org/10.19182/bft2010.305.a20440>
- Auer M., 2012. Group Forest Certification for Smallholders in Vietnam: An Early Test and Future Prospects. Human Ecology, 40: 5-14. <https://doi.org/10.1007/s10745-011-9451-6>
- Auld G., Gulbrandsen L. H., Mcdermott C. L., 2008. Certification schemes and the impacts on forests and forestry. Annual Review of Environment and Resources, 33: 187-211. <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.enviro.33.013007.103754>
- Castella J. C., Boissau S., Thanh N. H., Novosad P., 2006. Impact of forestland allocation on land use in a mountainous province of Vietnam. Land Use Policy, 23 (2): 147-160. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264837704000754>
- Cossalter C., Pye-Smith C., 2003. Fast-wood forestry: Myths and realities. CIFOR, Bogor, 60 p. [https://www.cifor.org/publications/pdf\\_files/Books/ForestPerspective.pdf](https://www.cifor.org/publications/pdf_files/Books/ForestPerspective.pdf)
- Deng B., Tammeorg P., Luukkanen O., Helenius J., Starr M., 2017. Effects of *Acacia seyal* and biochar on soil properties and sorghum yield in agroforestry systems in South Sudan. Agroforestry systems, 91 (1): 137-148. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10457-016-9914-2>
- Dirkswager A. L., Kilgore M. A., Becker D. R., Blinn C., Ek A., 2011. Logging Business Practices and Perspectives on Harvesting Forest Residues for Energy: A Minnesota Case Study. Northern Journal of Applied Forestry, 28 (1): 41-46. <https://academic.oup.com/njaf/article/28/1/41/4774124>
- Grimm M., Waibel H., Klases S., 2016. Vulnerability to Poverty: Theory, measurement and determinants, with case studies from Thailand and Vietnam. Springer, 337 p. <https://link.springer.com/book/10.1057/9780230306622>
- GSO, 2020. Complete results of the 2019 Vietnam population and housing census. Vietnam statistical publishing house, 43 p. <https://www.gso.gov.vn/en/data-and-statistics/2020/11/completed-results-of-the-2019-viet-nam-population-and-housing-census/>
- Ha H. T., 2008. Factors affecting farmers' decision on acacia plantation. Case study in Phu Loc district, Thừa Thiên Huế province - Pilot research supported by RDViet project. Hue University of Agriculture and Forestry.
- Harrison S. R., Herbohn J. L., 2001. Sustainable farm forestry in the tropics: Social and economic analysis and policy. Edward Elgar, 320 p. <https://www.e-elgar.com/shop/gbp/sustainable-farm-forestry-in-the-tropics-9781840647204.html>
- Helmsing A. H. J., Vellema S., 2011. Value Chains, Inclusion and Endogenous Development Contrasting Theories and Realities. Routledge, Taylor & Francis Group, 312 p. <https://www.routledge.com/Value-Chains-Social-Inclusion-and-Economic-Development-Contrasting-Theories/Helmsing-Vellema/p/book/9781138244009>
- Henriksen L. F., Riisgaard L., Ponte S., Hartwich F., Kormawa P., 2010. Agro-Food Value Chain Interventions in Asia. A review and analysis of case studies. Working Paper, Austria, UNIDO, IFAD, 60 p. [https://www.unido.org/sites/default/files/2011-01/WorkingPaper\\_VC\\_AsiaFinal\\_0.pdf](https://www.unido.org/sites/default/files/2011-01/WorkingPaper_VC_AsiaFinal_0.pdf)
- Hoang H. T. N., Hoshino S., Hashimoto S., 2015. Costs Comparison between FSC and Non FSC Acacia Plantations in Quang Tri Province, Vietnam. International Journal of Environmental Science and Development, 6 (12): 947-951. [https://www.unido.org/sites/default/files/2011-01/WorkingPaper\\_VC\\_AsiaFinal\\_0.pdf](https://www.unido.org/sites/default/files/2011-01/WorkingPaper_VC_AsiaFinal_0.pdf)
- Hoang H. T. N., Hoshino S., Onitsuka K., Maraseni T., 2019. Cost analysis of FSC forest certification and opportunities to cover the costs a case study of Quang Tri FSC group in Central Vietnam. Journal of Forest Research, 24 (3): 137-142. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13416979.2019.1610993>
- Humphrey J., 2004. Upgrading in global value chains. SSRN Working paper No 28, World Commission on the Social Dimension of Globalization, Geneva, Switzerland, 49 p. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.908214>
- Humphrey J., Schmitz H., 2000. Governance and upgrading: linking industrial cluster and global value chain research. Institute of Development Studies. International Labour Office WC908214, 120: 139-170. <https://www.ids.ac.uk/download.php?file=files/Wp120.pdf>
- Ingram V., Van Der Werf E., Kikulwe E., Wesseler J., 2016. Evaluating the impacts of plantations and associated forestry operations in Africa – Methods and indicators. International Forestry Review, 18 (1): 44-55. [https://www.cifor.org/publications/pdf\\_files/articles/AIngram1601.pdf](https://www.cifor.org/publications/pdf_files/articles/AIngram1601.pdf)
- Iwanaga S., Duong D. T., Ha H. T., Minh M. V., 2019. The tendency of expanding forest certification in Vietnam: Case analysis of certification holders in Quang Tri Province. Japan Agricultural Research Quarterly (JARQ). 53 (1): 69-80. [https://www.jircas.go.jp/sites/default/files/jarq/jarq/jarq53-1\\_69-80.pdf](https://www.jircas.go.jp/sites/default/files/jarq/jarq/jarq53-1_69-80.pdf)
- Kaplinsky R., Morris M., 2001. A handbook for value chain research. IDRC, Canada, 113 p. [https://www.fao.org/fileadmin/user\\_upload/fisheries/docs/Value\\_Chain\\_Handbook.pdf](https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/fisheries/docs/Value_Chain_Handbook.pdf)
- Kien N. D., Harwood C., 2017. Timber demand and supply in northwest Vietnam: the roles of natural forests and planted trees. Small-scale forestry, 16 (1): 65-82. <https://www.worldagroforestry.org/publication/timber-demand-and-supply-northwest-vietnam-roles-natural-forests-and-planted-trees>
- Kozei V., 2014. Reducing poverty among ethnic minorities. In: Well begun but not yet done: progress and emerging challenges for poverty reduction in Vietnam, chapter 5, Kozei V. (ed). World Bank Group, Washington, 169-193. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/20074>
- La N. H., Phong H. M., 2015. Study on Interplanting Density of Taros (*Colocasia esculenta* (L.) Schott) in *Acacia* (*Acacia mangium* Willd.) Plantation under the Agroforestry Model in Bac Kan Province. Journal of Agricultural Technology, 11 (8): 2157-2165. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20163272131>
- Lee S. H., Kim D. H., Jeong J. H., Han S. H., Kim S., Park H. J., et al., 2022. Developing a Yield Table and Analyzing the Economic Feasibility for Acacia Hybrid Plantations in Achieving Carbon Neutrality in Southern Vietnam. Forests, 13 (8): 1316. <https://www.mdpi.com/1999-4907/13/8/1316>

- Los B., Timmer M. P., De Vries G. J., 2015. How global are global value chains? A new approach to measure international fragmentation. *Journal of regional science*, 55 (1): 66-92. <https://doi.org/10.1111/jors.12121>
- Lua H. T., Simelton E., Tiep H. V., Toan V. D., Hoa N. T., Van Chung N., et al., 2013. Diagnosis of farming systems in the Agroforestry for Livelihoods of Smallholder farmers in Northwestern Viet Nam project. World Agroforestry Center, Working paper no. 161, 44 p. <https://apps.worldagroforestry.org/downloads/Publications/PDFS/WP13033.pdf>
- Maraseni T. N., Son H. L., Cockfield G., Duy H. V., Nghia T. D., 2017. Comparing the financial returns from acacia plantations with different plantation densities and rotation ages in Vietnam. *Forest Policy and Economics*, 83: 80-87. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2017.06.010>
- MARD, 2020. Decision 911/QĐ-BNN-TCLN on Announcing the current status of forests in 2019 dated 15 April 2020. Ministry of Agriculture and Rural Development (MARD). <https://tongcuclamnghep.gov.vn/content/uploads/files/2019.3.19%20No%20911.Q%4%90.BNN.TCLN%20DBR2018.pdf>
- Minot N., Baulch B., Epperecht M., 2006. Poverty and inequality in Vietnam: Spatial patterns and geographic determinants. Research report No. 148, International Food Policy Research Institute, 91 p. <https://ageconsearch.umn.edu/record/37882/files/rr148.pdf>
- MONRE (Ministry of Natural Resources and Environment Decision), 2014. Decision 1467/QĐ-BTNMT. The statistics of land area in 2013. Ministry of Natural Resources and Environment, Hanoi. Website. <https://thuvienphapluat.vn/van-ban/Bat-dong-san/Quy-et-dinh-1467-QĐ-BTNMT-2014-cong-bo-ket-qua-thong-ke-dien-tich-dat-dai-2013-254339.aspx>
- Mulia R., Nguyen M. P., Do H. T., 2018. Forest and crop-land intensification in the four agro-ecological regions of Vietnam: Impact assessment with the FALLOW model. In: *Towards Low-Emission Landscapes in Vietnam*; Mulia, R., Simelton, E. (eds). World Agroforestry (ICRAF), 89-108. <https://gender.cgiar.org/publications/towards-low-emissions-landscapes-viet-nam>
- Nambiar E. K. S., Harwood C. E., Kien N. D., 2015. Acacia plantations in Vietnam: research and knowledge application to secure a sustainable future. *Southern Forests: A Journal of Forest Science*, 77 (1): 1-10. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201500161052>
- Nawir A. A., Kassa H., Sandewall M., Dore D., Campbell B. M., Ohlsson B., et al., 2007. Stimulating smallholder tree planting – Lessons from Africa and Asia. *Unasylva*, 58 (228): 53-57. <https://www.fao.org/3/a1346e/a1346e14.pdf>
- Nguyen T. T., Masuda M., 2018. Land use after forestland allocation and the potential for farm forestry in a mountainous region of Northeast Vietnam. *Small-scale Forestry*, 485-503. <https://doi.org/10.1007/s11842-018-9399-0>
- Phuc T. X., Quang D. V., Huy T. L., Cam C. T., 2013. Woodchip export of Vietnam: Policy, market and livelihood of forest grower households. *Forest Trends, Information Brief, NORAD*. <https://www.forest-trends.org/wp-content/uploads/imported/information-brief-vn-wood-chip-industry-3-30-15-pdf.pdf>
- Po M., Pannell D. V., Walker I., Tapsuwan S., Dempster F., Mendham D. S., et al., 2023. Supporting smallholder acacia farmers in Viet Nam to transition to sawlog production: Opportunities and challenges. *Trees, Forests and People*, p.100384. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2023.100384>
- RESOLVE Inc., 2012. *Toward Sustainability – The roles and limitations of certification*. Steering committee of the state of knowledge assessment of standards and certification. Washington, DC, 21 p. <https://www.resolve.ngo/docs/toward-sustainability-executive-summary.pdf>
- RTI (Royal Tropical Institute), IIRR (International Institute of Rural Reconstruction), 2012. *Trading up: Building cooperation between farmers and traders in Africa*. Amsterdam/Nairobi, Royal Tropical Institute, International Institute of Rural Reconstruction, 300 p. <https://hdl.handle.net/10568/75523>
- Sandewall M., Ohlsson B., Sandewall R. K., Sy Viet L., 2010. The expansion of farm-based plantation forestry in Vietnam. *Ambio*, 39, 567-579. <https://doi.org/10.1007/s13280-010-0089-1>
- Schmitz H., 2005. *Value chain analysis for policy makers and practitioners*. International Labor Organization, 74 p. [https://www.ilo.org/global/publications/ilo-bookstore/order-online/books/WCMS\\_091713/lang--en/index.htm](https://www.ilo.org/global/publications/ilo-bookstore/order-online/books/WCMS_091713/lang--en/index.htm)
- Seigler D. S., 2002. Economic potential of Western Australian Acacia species: secondary plant products. *Conservation Science Western Australia*, 4 (3): 109-116. <https://www.dpaw.wa.gov.au/images/documents/about/science/cswa/articles/77.pdf>
- Vietnam Cooperative Alliance (VCA), 2019. *Vietnam Cooperative Alliance. Annual report 2018*. Vietnam Cooperative Alliance, 20 p. <https://vca.org.vn/en/annual-report-2019-a122.html>
- Vietnam Cooperative Alliance (VCA), 2020. *Annual report for 2019*. Vietnam Cooperative Alliance (VCA), 15-21. <https://vca.org.vn/en/annual-report-2019-a122.html>
- Wildayana E., 2016. Income increase of farmers through utilization of acacia logging residues for wood chips. *Habitat*, 27 (1): 48-54. <https://habitat.ub.ac.id/index.php/habitat/article/view/222/241>

### Ho et al. – Credit authorship contribution statement

Contributor role	Contributor names
Conceptualization	T. H. Ho, V. Ingram
Data Curation	T. H. Ho
Formal Analysis	T. H. Ho
Funding Acquisition	V. Ingram
Methodology	T. H. Ho, V. Ingram
Project Administration	T. H. Ho, V. Ingram
Writing – Original Draft Preparation	T. H. Ho, V. Ingram, T. T. M. Nguyễn, S. Iwanaga
Writing – Review & Editing	V. Ingram

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](mailto:bft@cirad.fr) - ISSN : L-0006-579X



# Analytical review of methods and tools for assessing crop damage caused by elephants: implications of new information technologies

Cynthia Axelle Eugénie N'SAFOU MBANI<sup>1</sup>  
Steeve NGAMA<sup>2</sup>  
Martin Ngankam TCHAMBA<sup>1</sup>  
Abubakar Ali SHIDIKI<sup>1</sup>  
Claude GNACADJA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> University of Dschang  
Faculty of Agronomy  
and Agricultural Sciences  
Department of Forestry  
B.P. 222 Dschang  
Cameroun

<sup>2</sup> Centre National  
de la Recherche Scientifique  
et du Développement  
Technologique  
Institut de Recherche  
Agronomiques et Forestières  
B.P. 2246, Libreville  
Gabon

**Auteur correspondant /  
Corresponding author:**  
Cynthia Axelle Eugénie  
N'SAFOU MBANI –  
[axellensafou@gmail.com](mailto:axellensafou@gmail.com) /  
[axellensa@yahoo.fr](mailto:axellensa@yahoo.fr)

 ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-3984-844X>



**Photo 1.**  
Collecting location data with the KoboCollect application and a smartphone.  
Photos C. N'safou Mbani.

Doi : 10.19182/bft2024.359.a37445 – Droit d'auteur © 2024, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 23 décembre 2022 ; date d'acceptation : 7 novembre 2023 ; date de publication : 29 février 2024.



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

## Citer l'article / To cite the article

N'safou Mbani C. A. E., Ngama S., Tchamba M. N., Shidiki A. A., Gnacadja C., 2024. Analytical review of methods and tools for assessing crop damage caused by elephants: implications of new information technologies. Bois et Forêts des Tropiques, 359 : 39-53. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2024.359.a37445>

## RÉSUMÉ

### Examen analytique des méthodes et outils d'évaluation des dommages causés aux cultures par les éléphants : implications des nouvelles technologies de l'information

La dévastation des cultures par les éléphants attise de plus en plus la colère des producteurs dans le conflit homme-éléphant. Cependant, les dégâts sur les cultures imputés aux éléphants par les agriculteurs semblent démesurés. Malgré l'observation de dégâts sur les espaces culturels, impactant la vie des populations locales, les évaluations des dégâts restent un sujet de controverse. La multitude de méthodes d'évaluations utilisées par les informateurs induit une difficulté à comparer les résultats issus de différentes zones et une difficulté à harmoniser et/ou transposer les stratégies de gestion. Il est donc judicieux de s'intéresser aux méthodes d'évaluation, de connaître leurs contraintes, avantages et leurs points de connexion. C'est l'objet de cette étude qui propose une synthèse bibliographique du sujet, basée sur une recherche documentaire, une analyse et synthèse des articles et documents. Il en ressort deux types d'évaluation de dégâts : une évaluation quantitative et une évaluation qualitative. Chaque type d'évaluation requiert des méthodes d'évaluations différentes, pouvant être associées pour des résultats plus précis. Une évaluation qualitative peut être effectuée par des entretiens, des questionnaires, des recherches documentaires, etc., et une évaluation quantitative par une visite totale du site, une visite des points chauds et froids du conflit, ou une visite d'un échantillon aléatoire du site. Les évaluations peuvent être jumelées car l'évaluation qualitative est subjective. Plusieurs informateurs y ont recours pour sa simplicité de réalisation et pour l'idée de l'état des dévastations des cultures et des contraintes sociologiques fournies. L'évaluation quantitative requiert des ressources mais fournit des résultats du terrain. Toutefois, le couplage des types d'évaluation améliore la précision, la fiabilité des résultats et la compréhension du conflit. Cette synthèse bibliographique révèle aussi des outils d'évaluation des dégâts portés aujourd'hui vers les nouvelles technologies d'information et de communication qui rendent le travail plus facile et précis.

**Mots-clés :** évaluation des dommages, méthodes d'évaluation, outils d'évaluation, outils traditionnels, outils numériques, conflit homme-éléphant, gestion participative.

## ABSTRACT

### Analytical review of methods and tools for assessing crop damage caused by elephants: implications of new information technologies

The devastation of crops by elephants is increasingly fuelling the anger of farmers in the human-elephant conflict. However, the crop damage attributed to elephants by farmers appears disproportionate. Despite the fact that observed crop damage has an impact on the lives of local populations, the assessment of damage remains a controversial issue. The multitude of evaluation methods used by informants makes it difficult to compare results from different areas and to harmonise and/or transpose management strategies. It is therefore wise to take an interest in evaluation methods, to know their constraints, their advantages, and their connection points. This is the purpose of this study, which offers a bibliographic synthesis of the subject based on documentary research and a synthetic analysis of articles and documents. Two types of damage assessment emerge: quantitative and qualitative. Each type of assessment requires different assessment methods, which can be combined to obtain more accurate results. A qualitative assessment can be carried out through interviews, questionnaires, bibliographic research/review, etc., and a quantitative assessment through a total site visit, a visit to conflict hot and cold spots, or a visit to a random sample of the site. Ratings can be combined because qualitative rating is subjective. Many informants use it because it is easy to carry out and gives an idea of the state of devastation of cultures and sociological constraints. Quantitative assessment requires resources but provides results on the ground. However, combining different types of assessment improves the accuracy, reliability of results, and understanding of the conflict. This bibliographic synthesis also reveals that damage assessment tools are today moving towards new information and communication technologies, because these make the work easier and more practical while improving precision.

**Keywords:** damage assessment, assessment methods, assessment tool, traditional tools, digital tools, human elephant conflict, participatory management.

## RESUMEN

### Revisión analítica de los métodos y herramientas para evaluar los daños causados por los elefantes en los cultivos: implicaciones de las nuevas tecnologías de la información

La devastación de los cultivos por los elefantes alimenta cada vez más la ira de los agricultores en el conflicto entre humanos y elefantes. Sin embargo, los daños a los cultivos atribuidos a los elefantes por los agricultores parecen desproporcionados. Aunque se han observado daños en los cultivos que afectan a la vida de las poblaciones locales, la evaluación de los daños sigue siendo una cuestión controvertida. La multitud de métodos de evaluación utilizados por los informadores dificulta la comparación de los resultados de las distintas zonas y la armonización y/o transposición de las estrategias de gestión. Por eso tiene sentido examinar los métodos de evaluación, conocer sus limitaciones, ventajas y puntos de conexión. Este es el objetivo del presente estudio, que propone una síntesis bibliográfica del tema, basada en una búsqueda documental, un análisis y síntesis de artículos y documentos. Surgen dos tipos de evaluación de daños: cuantitativa y cualitativa. Cada requiere métodos de evaluación diferentes, que pueden combinarse para obtener mejores resultados. Una evaluación cualitativa puede llevarse a cabo entrevistas, cuestionarios e investigación documental y una evaluación cuantitativa con una visita total del lugar, visita a los puntos calientes del conflicto o visita a una muestra aleatoria del lugar. Las evaluaciones pueden combinarse porque la evaluación cualitativa es subjetiva. Muchos informadores la utilizan porque es fácil de realizar y proporciona una idea del estado de devastación de los cultivos y de las limitaciones sociológicas. La evaluación cuantitativa requiere recursos, pero proporciona resultados sobre el terreno. La combinación de diferentes evaluaciones mejora la precisión, la fiabilidad de los resultados y la comprensión del conflicto. Esta revisión bibliográfica también revela que las herramientas de evaluación de daños están evolucionando hacia las nuevas tecnologías de la información y la comunicación, que facilitan el trabajo y mejoran la precisión de los resultados.

**Palabras clave:** evaluación de daños, métodos de evaluación, herramienta de evaluación, herramientas tradicionales; herramientas digitales, conflicto entre el hombre y el elefante, gestión participativa.

## Introduction

Human-elephant conflicts (HEC) resulting from crop damage caused by elephants are the most common form of conflict on all continents and in all elephant-bearing countries. It is recognised as the most prevalent form of human-wildlife conflict worldwide (Mishra et al. 2003; Atta et al. 2016; Manral et al. 2016; Liu et al. 2017). The subsistence crops of local populations, namely food and/or cash crops, are ravaged and destroyed by elephants (Fairet 2012; Kalyanasundaram et al. 2014; Ngama 2018). Elephants are crop raiders who forage on farms to meet their dietary needs because crops are nutritionally richer than wild plants (Sitati et al. 2003; Graham et al. 2010; Sitienei et al. 2014; Liu et al. 2016; Ngama 2018).

Crops are most often attacked at harvest time, prompting farmers to retaliate in the event of crop losses (Chen et al. 2006; Graham et al. 2010; Webber et al. 2011; Gubbi 2012; Atta et al. 2016). In India and Asia, for example, damage caused by elephants can be observed on more than 30 species cultivated by the population (Kalyanasundaram et al. 2014). However, the banana tree (*Musa paradisia*), the bethel palm (*Areca catechu*), and the coconut (*Cocos nucifera*) are the crops most plundered by elephants (Jayson and Christopher 2008; Suresh and Jayson 2016). Crop losses in countries with high elephant densities are high. Household income from agriculture declined by 35.1% in Baringo District, Kenya, in 2014 (Amwata and Mganga 2014). In the Democratic Republic of Congo (DRC), for example, elephants generally destroy cassava, which represents 65% of the most traded products, before consuming bananas; and the estimated annual economic losses per farmer were approximately 77% of the average gross domestic product (GDP) per capita (Inogwabini et al. 2013). In Gabon, crop damage is very significant in all conflict zones. Indeed, Walker (2011) notes that annual crop damage can be estimated at an average of 45% of total crops, and recorded damage on 75% of the total surface area of the fields studied in the Mont de Cristal Park area; this even though forests represent 97% of the landscape around villages. The presence of wild fruit trees in the plots, such as *Pseudospondias microcarpa*, *Chrysophyllum africanum*, *Irvingia gabonensis*, and *Tetrapleura tetraptera*, as well as the presence of certain plants, the first of which is the banana tree, in the plantations increases the occurrence of crop damage by elephants. These losses are particularly important for residents of areas whose diet and economy rely on these products (Mishra et al. 2003; Manral et al. 2016). Indeed, the relative impact of damage on household income varies considerably depending on economic dependence on agriculture and livestock. Thus, for households with subsistence savings, even small losses can have disastrous consequences (Oli 1994; Rao et al. 2002). Faced with these situations, distraught farmers often turn to administrations in search of solutions (ANPN 2016). The latter refers to the assessment methods and tools available to assess, quantify, and objectify the extent of the damage, as well as the responses and solutions to be provided (ANPN 2016).

The scale of damage caused by elephants to HEC crops often contrasts with the laments and discontent of farmers (Hoare 2007; Nsonsi 2018). Indeed, only a few farms are seriously affected, while many others are often little affected by elephant attacks (Nsonsi 2018). Small-scale damage is more common than large-scale damage (Nsonsi 2018). The damage is therefore often extrapolated or poorly assessed by farmers. Furthermore, elephants are part of a wide range of crop pests that includes several species such as primates, suids, rodents, birds, and insects (Hoare 2007, Fairet 2012). It is therefore often not easy to distinguish responsibilities for damage caused to crops among all the species concerned (Fairet 2012). The number of complaints about elephant damages seems disproportionate to its actual contribution to agricultural problems (Hoare 2007). Independent damage assessment using different methods and with different results presented in different ways makes it difficult to compare damage (Hoare 2007; Nsonsi 2018), although these methods are used according to the time and resources available to the assessor and the objectives of the assessor. Hoare (2007) decried the lack of a standardised system for assessing elephant crop damage, which prevents valid comparisons of the extent of damage and intensities of HEC both within and between different biogeographical regions of the world. Therefore, for greater clarity on all these issues, it is necessary to look at the crop damage assessment methods and tools used and/or available. Indeed, as much as an overview of management strategies and origins of HEC are proposed in journal articles (Shaffer et al. 2019; Nsonsi 2018), this is absent for crop damage assessment in HEC management (Hoare 1999; 2007).

The aim of this paper is therefore to review some of the knowledge on the assessment of crop damage by elephants, focusing on: i) the types and methods of damage assessment; ii) the tools used in the assessment and/or that can be used today; and iii) the implication of the latter in HEC management. It builds on the methods and tools currently in use and presents those that should be considered.

## Methodology

For this work, we carried out a bibliographic research/review in the databases provided by the search engines Google, Google Scholar, Academia, Web Science, Elsevier, and Human-Wildlife Conflict and Coexistence. The initial key sentences were “human-elephant conflict”, “elephant crop damage assessment” and “data collection tools”. These initial researches/review resulted in more than 150 articles, theses, master’s theses, and documents containing the keywords. We selected 60 sources in English or French, consisting of academic research and reports that address the subject, produced by conservation practitioners and organisations. The analysis aims to provide trends and identify existing research on how human-wildlife conflicts are assessed on the ground, particularly conflicts between elephants and herders.

This review focuses specifically on methods and tools for assessing crop damage caused by wild herbivores. We examined the documents found and classified them according to the themes they addressed in their content, namely the method of evaluation between them and the evaluation tools between them. Even if research has particularly focused on elephant-human conflicts: the involvement of technological communication tools in the reporting of these destructions has been developed. The scope includes disputes or confrontations involving individuals or communities over time, ranging from isolated to multi-stage incidents.

## Results

### Methods for assessing incidents of crop damage caused by elephants

There are two types of assessment of crop damage caused by elephants: qualitative assessment and quantitative assessment of crop damage. Several methods can be used to arrive at these types of evaluations and depend on them. However, the choice of method of assessing crop damage varies from one person to another (population, conservationist, and researcher) depending on time, resources, and objectives relating to the crop damage evaluation (Hoare 2001). Damage assessment methods depend on the type of assessment required.

Quantitative evaluation provides objective and unbiased numerical information through human emotion. They are easy to analyse and compare with figures from other areas. Examples of quantitative data are spatial measurements such as the area of a field, the location of damage (HEC maps on Geographic Information System, GIS), the number of droppings, etc. (Hoare 2007; Parker et al. 2007).

A qualitative assessment of crop damage caused by elephants helps to understand the direct and indirect problems of the incidents. It offers a wide range of issues to address in relation to incidents (physical damage, risk perception, and strong emotions) (Hoare 2007; Parker et al. 2007).

#### Qualitative evaluation method

There are many methods for obtaining a qualitative damage assessment. These include meetings, interviews, questionnaires, observations, and documentary research:

- Meetings (formal or informal) can be organised to gather information and can be as simple as a conversation in the street.
- Interviews, on the other hand, help to understand people's feelings and points of view. They can also be used to explore the history of the problem and gather basic information.
- Questionnaires are used at times when we want to ensure that standardized information is collected.
- Finally, observations can be based on own observations and perceptions of a place, while documentary research is limited to searching for documents that already describe the conflict in the area studied (Gubbi 2012).

Interviews and questionnaires are also called surveys of conflict stakeholders (producers, authorities, environmental defenders, etc.). Surveys are carried out to obtain information on damage caused to plantations by residents of an area (Hoare 2007; Tekem Tessa and Tiawoun 2008; Nath et al. 2009; Kalyanasundaram et al. 2014; Lingaraju and Venkataramana 2016). Questionnaires are directed or directional surveys, while interviews can be semi-directional or open-ended surveys. In these methods, no evaluation or data collection consider real-time field data (Kouao et al. 2018).

Recording damage using these methods is often a "passive" task for the investigator. Thus, when correctly applied, the results logically lead to a descriptive summary called the "raid frequency index" or RFI (Hoare 2007). These frequency indices integrate both spatial and temporal dimensions (Hoare 2007). The results show the periods of intrusions, the crops most attacked, and the quantities destroyed according to the respondent's own assessment. This method is entirely appropriate for sociological and anthropological approaches to conflicts (Hoare 2007), and requires little time and few resources to implement.

#### Quantitative evaluation method

A quantitative assessment of crop damage caused by elephants requires a face-to-face assessment of devastated fields or areas. There are three types of assessment methods: sampling the terrain or area, visiting the entire area, and finally visiting conflict hot or cold spots (places known to everyone due to the presence or absence of the problem) (Hoare 2007; Parker et al. 2007):

- Visiting conflict hot or cold spots is a field assessment method carried out directly in previously known areas. This method requires certainty as to the existence of areas where damage is present or absent (distribution and location) and the frequency of damage (duration/repeatability of damage). It was popularized by the International Union for Conservation of Nature (IUCN), when it identified the need to standardize data collection on HEC (Kouao et al. 2018; Mishra et al. 2015). In practice, assessing the damage with this model requires good judgement and the use of maps (locating the location of the incident and interpreting the map) and a global positioning system (GPS) (Hoare 2007; Parker et al. 2007).
- The evaluation method by field sampling consists of evaluating in the field a percentage of plants present in randomly chosen sampling units representative of the plantation (if we take into account the stratification of the area, the effects borders...). These sampling units are observation grids of variable dimensions, well defined depending on the author and the study (Naughton-Treves, 1998; Inogwabini et al. 2013; Atta et al. 2016; Kouao et al. 2018). Observations on the probable presence of crop damage caused by elephants are made in these sampling units. The random nature of data collection means that data will not be collected solely or necessarily at the scene of incidents. Likewise, the total area of fields and the areas destroyed are estimated within the sampling units by considering the regular geometric shapes they occupy (squares, rectangles, triangles, etc.). This model is used by several authors,

including Ouattara et al. (2010), who collected their data in the field in two plots of 2,000 m x 500 m, unlike Atta et al. (2016) who used plots of 50 m x 50 m in a plantation, in which plants damaged by elephants (uprooted, broken, organs consumed, etc.) were counted to later extrapolate them to the entire impacted field.

- Visiting the entire area consists, as its name suggests, of searching the entire area for places where there is damage.

### Qualitative and quantitative assessment methods

Qualitative assessment can be combined with quantitative assessment. This is the most recommended form of crop damage assessment. This evaluation must begin with the qualitative evaluation and end with the quantitative evaluation, because the second phase allows us to confirm or refute the information obtained during the first phase (Hoare 2007; Inogwabini et al. 2013; Mishra et al. 2015; Atta et al. 2016; Suresh and Jayson 2016; Kouao et al. 2018). Indeed, the observation of damage on the ground during the second phase is in one way or another derived from information previously collected from stakeholders. This evaluation makes it possible to obtain precise results in terms of perception and reality, but nevertheless requires relatively acceptable conditions in terms of costs, deadlines, and logistics for its feasibility (Mavah et al. 2006; Nyemgah Wo-Ndong 2009; Sidaway 2010; Sirima et al. 2020; Kobon et al. 2022).

### Analysis and comparability of assessment types and methods

Table I presents the authors' list of bibliographic references dealing with the assessment of crop damage in human-elephant conflicts. We note that out of the 64 documents and articles, we found the types and methods of evaluation in 27. Among these 27 documents and articles (42.2%), 22 documents (81.5%) combined the two methods of evaluation of damage (qualitative and quantitative). This combined assessment makes it possible to obtain quantitative data which are real and objective figures, not biased by human emotions and which reflect the situation on the ground (Parker et al 2007). However, surveys reflect the views and feelings of the respondents. 11.1% of the authors out of the 27 made a purely qualitative evaluation. The remaining 7.4% of authors presented the methods to be used. Surveys coupled with visits to conflict hotspots are the most used methods in the panel of 27 authors, i.e. 29.7%, followed by surveys coupled with random sampling (22.2%). However, we see in this table I that the different evaluation methods can be associated with each other, for example, random sampling of conflict hot or cold spots (Ouattara et al. 2010; Sidaway 2010; Boukoulou et al. 2012; Hema et al. 2018).

Table II presents the advantages and disadvantages of the different evaluation methods. Damage assessment based solely on surveys, documentary research, and meetings with

**Table I.**  
Study on damage assessment.

N°	Study using one or more types of assessment	Objective	Quantitative evaluation methods	Qualitative evaluation methods	Number of studies	%
	Total documents in list of bibliographic				27 on 64	42.2
	Total of documents combining qualitative and quantitative assessment on the 27 documents				22 on 27	81.5
1	Qualitative assessment	Assess the damage caused by elephants	-	Documentary research	2/27	7.4
2	Qualitative assessment	Analysis of human-elephant conflict	-	Survey	1/27	3.7
	Total qualitative evaluation studies				3/27	11.1
3	Qualitative and quantitative assessment	Assess the damage caused by elephants	Randomly placed collection grids	Survey	6/27	22.2
4	Qualitative and quantitative assessment	Assessing the damage caused by elephants	Farmers visit fields declared conflict hotspots	Survey	8/27	29.6
5	Qualitative and quantitative assessment	Compare surveys with damage in the field	Randomly placed collection grids	Documentary research and meeting	2/27	7.4
6	Qualitative and quantitative assessment	Assess the damage caused by elephants	Surveying the entire area	Survey	2/27	7.4
7	Qualitative and quantitative assessment	Assess the damage caused by elephants	Farmers visit fields declared conflict hotspots	Documentary research and meeting	1/27	3.7
8	Qualitative and quantitative assessment	Analysis of crop damage	Randomly placed collection grids in areas identified as hot and cold spots by local people	Survey	2/27	7.4
9	Qualitative and quantitative assessment	Inventory of human-elephant conflicts	Visit to random fields declared conflict hotspots by producers	Survey	1/27	3.7
	Total qualitative and quantitative evaluation studies				22/27	81.5
10	Descriptions of all types and methods of evaluation				2/64	3.1

**Table II.**  
Advantages and disadvantages of the valuation type, method and model.

Type/method/model of assessment	Advantage	Disadvantage
Qualitative evaluation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Provides direct assessments (areas devastated, space and time, etc.).</li> <li>• Helps to understand the indirect problems of the conflict (impact, fears, etc.).</li> <li>• Easy to carry out, as there is no need to go out into the field.</li> <li>• Low resource requirements (financial, human, material and time) compared with quantitative assessments.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A team of trained monitoring agents is required.</li> <li>• A good understanding of the objectives to be achieved and the methods and techniques to be used to assess the damage.</li> <li>• Good ability to gather, translate and interpret information.</li> <li>• Lack of precision can be overcome by quantitative assessments.</li> </ul>
Quantitative assessment	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Easy to analyse because it provides figures and is easier to compare with other areas.</li> <li>• Accuracy of information.</li> <li>• Helps to understand the direct problems of the damage (area devastated, number of elephants involved, space-time assessment, etc.).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A team of trained monitoring agents is required.</li> <li>• Information must be comparable with other areas.</li> <li>• Maximum amount of data describing the conflict, but sometimes not used.</li> <li>• Does not take into account indirect problems such as fear...</li> <li>• Need for resources (financial, human and material) to carry out assessments in the field.</li> <li>• Significant investment of time.</li> </ul>
Evaluation methods by sampling the area	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Assessment of the conflict in the area is more accurate than in the hot or cold spots in that it gives an overview of the situation of elephant attacks at plantation and area level.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• If the knowledge of the environment, the grid and the sample are not consistent (strata, etc.), and if information such as the edge effect is forgotten, the assessment could be biased.</li> <li>• Good judgement and use of maps (locating the location of the incident and interpreting the map), and GPS.</li> <li>• Need for resources (financial, human and material) to carry out field assessments.</li> <li>• Technical knowledge required to carry it out.</li> </ul>
Method for assessing hot and cold spots in the area	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conflict assessment in known areas.</li> <li>• The simplest method for quantitative assessment.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Good judgement and use of maps (location of incident and interpretation of map) and GPS.</li> <li>• Possibility of missing data in areas that have not been prospected and therefore of screwing up the data.</li> </ul>
Method for surveying the entire area	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conflict assessment in the area is complete.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Depends on time, surface area and resources.</li> <li>• Need for resources (financial, human and material) to carry out field assessments.</li> </ul>

the population will only produce results that can easily be described as descriptive and subjective (Hoare 2007). However, these methods are justified in assessment studies, as they provide insight into the damage situation at local and global levels, while remaining easier to use and implement, even under conditions of limited time and resources.

The quantitative assessment itself makes it possible to understand the damage on the ground (Nsonsi 2018). However, the application of a visit to the entire site (Mavah et al. 2006), a random or even stratified sample (Naughton-Treves, 1998), and visits to the hot and cold spots of the conflict areas depends on time, resources, and objectives (Graham et al. 2010). On the other hand, an information bias could appear in the visit to hot and cold spots (table II). Indeed, in these two cases, if several parameters are not taken into account, such as the edge effect, stratification, etc., information could go unnoticed, thus producing questionable results.

The information collected during the second phase (in the field) and/or during the first phase (from stakeholders) is of several types. The general, devastated areas of fields (Hoare 2007; Parker et al. 2007) provide information on the extent of the damage. The quality of the crops before and after the damage, as well as their stage of development, give an idea of the seriousness of the disaster. This is usually done by categorizing plants (good, average, poor plant quality, young plants, intermediate growth, mature plants, etc.). The information already described can then be used to estimate the losses incurred. Observation of the consumption or pillaging of crops, the trampling of crops, the location of devastated fields, destroyed and/or non-destroyed crops, the impacted area, the frequency of damage and/or incursions, periods of damage, and the type of culture destroyed provides information on the origin or reason for the conflict.

Damage assessment is carried out using various tools. For each type of evaluation, different tools can be used and/or combined, depending on the methods chosen. These tools can be traditional or digital.

### Damage assessment tools

The damage assessment must be carried out using the right tools. For each type of evaluation, different tools can be used separately or combined depending on the methods chosen, making it possible to create circuits for collecting, processing, and analysing data and, therefore, assessment of the damage.

Nowadays, data collection and evaluation tools are classified into two types: traditional tools and digital tools. By digital tools, we mean technological or digital tools that operate by leveraging computer data. Digital tools can be devices such as smartphones, tablets or laptops. Digital tools also include software and online platforms called specific digital tools. However, here we are referring to classic tools and everything that has nothing to do with digital, such as paper, notebooks and pens, tape measurers.

In this document, we will present all the data collection tools that exist in the environmental field, specifying those already used in the assessment of damages for the management of HCE and those not yet used in the assessment of damages for the management of HEC, as well as their advantages and disadvantages.

### Classic and digital qualitative and quantitative assessment tools

Classical and/or digital tools for qualitative and/or quantitative assessment of crop damage are used in the different damage assessment methods for data collection, processing and analysis.

For qualitative and quantitative assessment, the classic tools are pens, pencils, sheets of paper, a notebook or notebook to collect information; strings, a tape measure, or the number of steps to determine surfaces; and a compass for orientation.

For qualitative and quantitative assessment, digital tools used in the environmental field include electronic notebooks, GPS devices to record areas and locations, and cameras to capture images. Smartphones and tablets are also digital tools that combine several other tools (cameras, notebooks, location recording).



**Photos 2.**

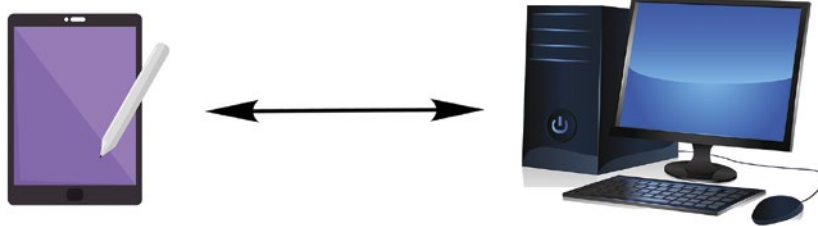
Damage to banana trees destroyed by elephants (A and B).  
Photos C. N'safou Mbani.

The data collected is generally processed and analysed using digital tools (software) embedded in computers. These can be of all kinds. Mapping software or tools (ArcGIS, QGIS, etc.) make it possible to process, visualize, manage, create, and analyse geographic data in terms of position, location, and surface area. Electronic spreadsheet software or tools (Microsoft Excel) for quick and accurate calculations. Software or statistical analysis tools (R, STATISTICA, etc.) are used to analyse the data. Digital data processing and analysis tools are cited in studies assessing damage by elephants because they are used in 100% of studies.

### Specific digital tools

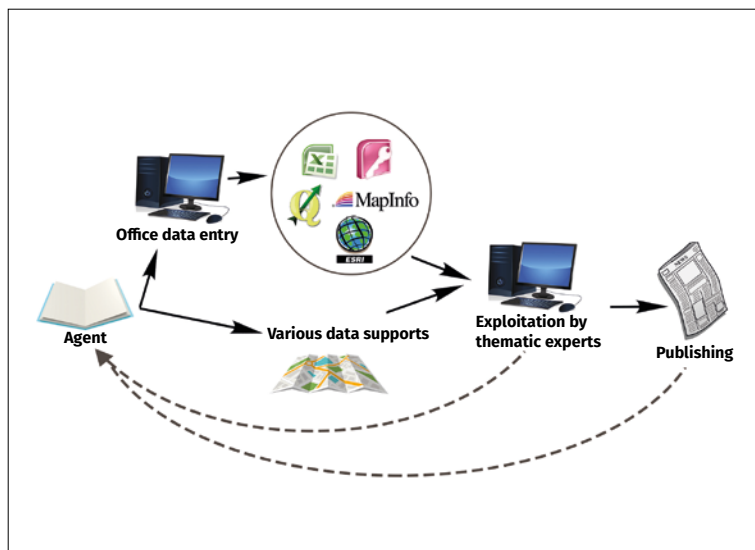
Several specific software and applications that could be described as connected digital tools have been developed and exist today. Their particularity is that they alone allow data to be collected, processed, and analysed. These are specific digital tools allowing simple and rapid evaluation, often called decision support tools. They must be connected or embedded in specific and specially adapted devices (androids, Personal Digital Assistants, etc.) to enable the collection of all necessary information. With this type of digital tool, data such as sounds, photos, videos, recording of points or traces (lines and areas) of GPS coordinates, geolocation, observation notes, areas, etc., can be collected directly (Stevenson et al. 2003). Data is easy to process because it can be extracted from devices and sent and stored directly in “master software or tools” via Universal Serial Bus port (USB), or the Internet.

As a result, data is present in computers without the need to manipulate it (figure 1). These tools can also be used for analyses and cartographic processing thanks to their extensions and connections. These connected digital tools are developed and used to reduce the data evaluation circuit (collection, processing, and analysis of data) and limit errors in transcription, transfer, and analysis of information (Bossaert et al. 2015). None of the various studies on the assessment of crop damage caused by elephants yet mentions such specific tools, even if tests of such tools have been carried out in certain countries such as Gabon (ANPN 2016) and Southern Africa (Le Bel et al. 2015). However, in the management of the HEC, which includes reporting attacks and monitoring pachyderms in conflict zones, connected digital tools have already been tested and cited. In other areas, connected digital tools have been created and exist, such as Ornidroid in ornithology; CarNat as a forest key in floristry; Anymals + plants for identification keys for fauna and flora; SMART in wildlife management; ODK collects for general surveys; Cybertracker for wildlife inventory, etc. (Liebenberg et al. 1998, 1999; OSU OREME 2012ab; Bossaert et al. 2015; Renggli et al. 2018; Olajide 2019).



**Figure 1.**

Data collection with a digital tool. Source: Bossaert et al., 2015.



**Figure 2.**

Normal data collection circuit when using conventional tools. Source: Bossaert et al., 2015.



**Figure 3.**

Data collection circuit with a digital tool. Source: Bossaert et al., 2015.



The addition and development of specific digital tools make it possible to divide the evaluation circuit into two types: the classic evaluation circuit, and the evaluation circuit using connected digital tools.

#### Classic evaluation circuit

The classic or conventional evaluation circuit involves the use of classic and digital tools for the collection, processing, and analysis of data (figure 2). This circuit consists of collecting data in the field using traditional or digital tools, transcribing them, or transferring them to a computer to process and analyse them using other digital tools (statistical analysis, establishment maps, etc.) (Bossaert et al. 2015). This is the circuit that we find in all (100%) studies on crop damage caused by elephants in HEC.

#### Evaluation circuit using connected digital tools.

The journey using connected digital tools or software makes it possible to collect all the necessary information using the tool embedded on suitable devices (phone, tablet, etc.) (OSU OREME 2012ab; Bossaert et al. 2015; Blanárová 2017). The software can be downloaded to a device, which allows multiple devices to have access to it (figure 3), i.e. multiple collectors transferring data to the same computing server. Installing digital tools in devices requires a minimum of configuration, the presence of two modules (a data server module and a client module installed on mobile devices), as well as the ability for the device to access the computing server either by web or by satellite (Bossaert et al. 2015). Although this assessment circuit has been introduced in several wildlife management studies, it has not yet been cited in studies assessing the damage caused by elephants to crops.



**Photos 3.**

Elephant identification index: (A) Elephant droppings; (B) Cassava plant destroyed by consumption.  
 Photos C. N'safou Mbani.

### Analysis, advantages and disadvantages of digital tools

Assessment tools are increasingly moving towards digital tools compared to traditional tools, even if they have not yet been introduced in damage assessment for HEC management for specific digital tools or connected. However, the development of completely connected digital tools is popularised and encouraged, and even tested (Chhem 2016). However, as with other evaluation tools and circuits, there are advantages and disadvantages (Stevenson et al. 2003) (table III). Traditional tools (sheets of paper, surfaces, etc.) require a less expensive purchase than the use of digital tools in general (camera, phone, GPS, etc.). However, data may be altered during transcription. If the data collected with connected digital tools will be preserved and faithfully transcribed, the collection of data requires certain conditions, such as the energy in the tools. Also, suppose the use of connected digital tools offers the possibility of carrying out the entire evaluation circuit (collection, transfer, processing and analysis of data) in less time than a traditional

evaluation, by removing the step transcription and avoiding the loss of information. In that case, this still requires a minimum of equipment and training adapted to the handling of these tools.

Collecting or evaluating data with connected digital tools offers the possibility of participatory data collection, centralizing data with numerous collectors, given that the tool can be embedded in several devices. Since there are now a multitude of connected digital tools that allow or attempt to meet field needs in several areas (Chhem 2016), there is also the freedom to download these applications for greater competitiveness and objectivity (OSU OREME 2012a; Bossaert et al. 2015). One of the biggest disadvantages of connected digital tools is that they can encounter several difficulties when using them. We can observe the deterioration of the devices, the impossibility of using them in the event of a low battery, the obligation to adapt between the networks of tools used, and the need for adequate training in their use.

**Table III.**

Advantages and disadvantages of assessment tools and circuits.

Assessment tools and circuits	Advantage	Disadvantage
Data collection using traditional tools (paper, decimeters, number of steps, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ease of direct collection of data not considered but observed during the study.</li> <li>• Low cost of traditional tools compared to digital tools.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risk of data loss during storage and transfer of information for analysis, altering the final results.</li> <li>• In the case of multiple agents at the various stages of data collection, transcription and analysis, there must be confidence in the data.</li> <li>• Longer procedure than with digital tools.</li> </ul>
Data collection using digital tools (GPS, cameras, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Data stored in the tool.</li> <li>• Data collected quickly and easily with the right tools.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risk of losing the tool and therefore the data if it has to be transcribed from data collection to analysis.</li> <li>• Energy required to operate tools.</li> <li>• Weather conditions that may prevent the tool from working properly.</li> <li>• Cost of acquiring the tools is higher than that of conventional tools.</li> <li>• Knowledge of how to use them is required.</li> </ul>
Conventional damage assessment circuit (use of several tools)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Control and management of information at every stage of the circuit.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risk of losing the tool and/or the data when transferring data from collection to analysis if the tools are different from one another.</li> <li>• Lengthy data collection circuit for data entry, processing and analysis.</li> </ul>
Digital damage assessment circuit (use of tools or software in plug-in devices: e.g. SMART, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No need to transcribe information.</li> <li>• Short data collection, processing and analysis circuits.</li> <li>• Possibility of collecting several pieces of information using the same tool embedded in the appropriate device.</li> <li>• Central database hosted on a computer and secured personally.</li> <li>• Possibility of having several collection devices.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Need for equipment that can accommodate tools.</li> <li>• Need to recharge equipment.</li> <li>• The cost and performance of the equipment to be used must be taken into account in their choice.</li> </ul>
Digital damage assessment circuit (use of tools or software in internet-connected devices: e.g. Kobotoolbox, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No need to transcribe information.</li> <li>• Short data collection, processing and analysis circuit.</li> <li>• Possibility of collecting several pieces of information using the same on-board tool in the appropriate device.</li> <li>• Central database hosted and backed up on the Internet.</li> <li>• Possibility of having several collection devices.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difficulty in transferring information in the event of an Internet blackout.</li> <li>• Central database hosted on the Internet and risk of piracy.</li> <li>• Requirement to have devices that can receive the tools.</li> <li>• Need to recharge equipment.</li> <li>• The cost and performance of the equipment to be used must be taken into account in their choice.</li> </ul>

Thus, even if they are not yet developed in the field of damage assessment in the management of HEC, their introduction and/or development would also make it possible to benefit from the advantages offered by these tools, in addition to become basic decision-making tools in the long term.

### **Introduction of connected digital damage assessment tools for HEC management**

#### **The first steps of connected digital tools in HEC management**

The use of connected digital tools in the management of HEC is of great importance today. They have already been used in several projects with good results. Five references in our review present studies using connected digital tools in the management of HEC. Two of them feature digital tools connected to elephant tracking devices (cell phones) with positioning systems through which smart collars attached to the elephants relayed location information over the cell phone network in Laikipia County (Kenya) and Sri Lanka (Graham et al. 2009). These tools were used to reduce HEC if the position of elephants in space and time could be determined. The other three studies focus on the presence of mobile phones in rural conflict contexts (Gamage and Wijesundara 2014), which allow the use of Global System for Mobile communications. Likewise, they show improved communication during an early warning of conflict between humans and elephants with authorities to coordinate responses to incidents (Sitati et al. 2005; Le Bel et al. 2014). Indeed, communication by mobile phone has helped to bridge possible communication gaps between different groups in conflict (communities, private landowners and local authorities) by creating an effective local network for inclusive social learning. This has gone a long way towards building trust, which is vitally important not only for the uptake of information and communication, but also for addressing wider conservation issues (Pretty 2002; Morawczynski and Miscione 2008; Boyle 2010; Graham et al. 2011; Lewis et al. 2016). This has led to an increase in the use of mobile phones and other means of information and communication technology (ICT) in protected areas and rural environments in developing countries (Le Bel et al. 2014, 2015; Lewis et al. 2016). Their use in rural areas has already shown great potential in HEC management.

The use of connected digital tools to assess elephant damage on plantations can be added to the services that phones can provide in HEC management. Indeed, limiting the use of mobile phones to improve communication between HEC stakeholders highlights certain difficulties, such as network coverage in forest areas (Gamage and Wijesundara 2014; Lewis et al. 2016). The use of more accessible satellite monitoring (Annasiwaththa et al. 2012) therefore facilitates the use of digital tools in the assessment of damage caused by elephants, as they are used in other aspects of conflicts between man and wildlife.

Two studies were carried out on this subject using a connected digital tool, KoBoCollect for testing (ANPN 2016; Le Bel et al. 2015). The latter tested the damage assessment with this tool in two areas, one in South Africa and the other in Gabon. In doing so, they demonstrate the ability of a fun-

damentally open and universally accessible tool for assessment in different fields to be used in the field of elephant crop damage assessment. Indeed, even if specific tools exist for each field (entomology, health, wildlife management, etc.), there is not yet a tool specific to this field of wildlife damage assessment and management of human-elephant conflict (HEC)/human-wildlife conflict (HWC). This is why creating specific tools or using tools from other areas of this HEC area is just as feasible if the results are the same in terms of cost, effectiveness, etc.

#### **Examples of digital tools used and that can be used to assess the damage caused by elephants**

Several connected digital tools exist. Some of them are gradually being introduced into the assessment of damage caused by elephants and into the management of HECs. Others, used elsewhere, seem suitable for use in the HEC/HWC field due to their usefulness and adaptability. Here we will present one of the main ones in each field: the SMART/Cyber tracker and the KoBoToolbox.

#### **SMART platform and his tools**

The Spatial Monitoring and Reporting Tool (SMART) is a platform that was designed to “improve anti-poaching efforts and overall law enforcement effectiveness in conservation areas and established management areas” (OSU OREME 2012ab; SMART 2017). SMART is a panel of software tools that allows the collection, storage, communication, and evaluation of data and results of the fight against poaching in protected areas. In several sites using the SMART, its effectiveness has already been demonstrated (SMART 2017). The use of SMART platform and the establishment of a database make it possible to obtain key information in the field when the collection sheets are well-developed (OSU OREME 2012ab). For example, it provides information such as GPS points and makes it possible to design maps of study areas, observations to be noted, filmed and selected from several previously encoded. Another of its advantages is the data security it provides; since the tool is secure on a computer and does not have a direct link to the web, which can create a hackable environment. Its partnership with Cyber Tracker means that many situations are already encoded or illustrated in the tool, such as the presence of animal evidence, damage to crops, human activities, etc. Observations during the assessment of damage that relate to devastated areas, GPS points of the location, and crop conditions before and after the damage, in addition to images, can be collected with the SMART platform. It is therefore a tool that can be used to assess damage on the ground. However, the SMART platform still remains difficult to use for certain tasks, such as taking area measurements, unlike GPS or the classic method with the tape measure. This is why it is necessary to accompany these digital tools with other conventional tools to overcome these limitations in the field of damage assessment. However, being a constantly evolving tool for good competition with other tools, its designers add extensions year after year, allowing it to perform more tasks. Therefore, its improvement for damage assessment is still possible.

### KoBoToolbox

The KoBoToolbox is a data collection, management, and visualization platform used globally for research and social good. It was developed by the Harvard Humanitarian Initiative, an organisation hosted at Harvard University and distributed and supported by the United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (UNOCHA). It is appreciated for its comprehensiveness, ranging from questionnaire design, device data collection, and related tool suites, such as KoBoCollect and ODK collect, data storage and analysis of the results. It allows everyone (researchers, NGOs, etc.) to have access to its interface to store large quantities of data. If it were not for the ethical character of UNOCHA, the presence of the interface on the Web could create doubts about the fact that it could be hacked. With the KoBoToolbox many tasks are possible, such as area and population surveys, audio photos, and GPS points. Assessing damage with this tool is easy because it includes all the necessary tasks for a good evaluation, whether for the producer survey or the field evaluation. Unlike SMART, which is still only used for anti-poaching purposes, KoBoCollect has already been tested in South Africa to collect data (Le Bel et al. 2015).

### Perspectives for damage assessment in HEC management

The evaluation circuit using connected digital tools seems to be established in science in general. It should therefore continue to be introduced in the evaluation of damage caused to crops by elephants for the management of HEC, like the KoBoCollect which is currently being tested. Indeed, as it eliminates and facilitates several tedious steps in the damage assessment process (ease of data collection, elimination of the transcription step, etc.), it is now appreciated by its peers. Likewise, with advantages such as allowing multiple and participatory use by different people, and centralised data accessible to all, the field of crops, damage assessment, and HEC management could be improved. For example, all parties involved in the conflict could have access to these tools. Anyone could collect data and assess damage freely and in real-time using the tool. Given the increased trust that a well-organised and regulated participatory activity can generate, this type of tool would therefore make it possible to establish a relationship of trust between the actors in the conflict and to improve the management of HEC.

On the other hand, the use of the evaluation circuit with connected digital tools requires much more careful work in developing the data collection sheet by each person so as not to forget anything in the field because, with a sheet of paper and a pen, the investigator can quickly note a point that he forgot to enter in his data collection form. This is more difficult to do with a digital form if it is not correctly configured. Similarly, using connected digital tools such as KoBoCollect to assess crop damage from elephants means that the cost/effort factor and the ability to understand and use the tools must be taken into account. Even if the results of using these tools are accurate, the cost of obtaining them (phones adapted to the tools, etc.) and the effort required to use and understand them must be accessible to everyone (Mayer et al. 2008).

## Conclusion

Elephant damage assessment involves two main types of assessment: qualitative and quantitative. The evaluation methods used for both types are multiple and can be combined. We have a qualitative assessment through interviews, questionnaires, etc., with parties involved in conflicts and using desk research to obtain information. And we have a quantitative assessment through a total site visit, a visit to conflict hot and cold spots, or a visit to a random sample of the site to get real data on the ground. In order to confirm or refute the assessments made, it is possible to compare the results by combining both types of evaluation and the different methods within each type.

The digital space currently being developed offers advantages thanks to the design of connected digital tools already widely used in several areas of environment and wildlife management (SMART for anti-poaching efforts). These are digital tools (hardware and software) that allow data to be collected, transcribed and analysed quickly and securely. In the field of assessing crop damage caused by elephants, connected digital tools such as KoBoCollect are also offered, encouraged and tested because they make the work easier.

But also, thanks to the development of participatory actions among several people that this type of tool offers, their use would open the doors to improving the management of human-elephant conflicts (HEC). All stakeholders could be more involved in the damage assessment and a climate of trust could be created between the authorities and the producers.

It is important to know whether the digital tools and mobile devices necessary for their use are accessible in terms of cost and feasibility, and whether they can be understood by all stakeholders (producers, NGOs, government) in order to achieve the best results and get the most out of their use.

### Acknowledgement

We would like to thank everyone who participated in the writing, correction and proofreading of this document. We would also like to thank the WWF Gamba Complex South Program team for their technical support.

### Funding

The research presented in this manuscript is the result of individual self-financing.

## References

- Amwata D. A., Mganga K. Z., 2014. The African elephant and food security in Africa. Experiences from Baringo District, Kenya. *Pachyderm* No. 55, 23-29. [https://www.researchgate.net/publication/288363931\\_The\\_African\\_elephant\\_and\\_food\\_security\\_in\\_Africa\\_Experiences\\_from\\_Baringo\\_District\\_Kenya](https://www.researchgate.net/publication/288363931_The_African_elephant_and_food_security_in_Africa_Experiences_from_Baringo_District_Kenya)
- Annasiwaththa B. I., Munasinghe R., Fernando P., Leimgruber P., 2010. Design and development of power optimized satellite elephant collar with over the air programmability. IEEE 6th International Conference on Information and Automation for Sustainability, Gajah, 34: 67-84. [http://www.ccrsl.org/userobjects/2653\\_524\\_Pastorini-11-Abstracts34.pdf](http://www.ccrsl.org/userobjects/2653_524_Pastorini-11-Abstracts34.pdf)
- ANPN (Agence nationale des Parcs nationaux), 2016. Cadre de gestion environnementale et sociale (CGES). Projet de gestion de la faune et des conflits Homme-Éléphant dans le Sud du Gabon, 132 p. <https://documents1.worldbank.org/curated/fr/404971468273904433/Cadre-de-gestion-environnementale-et-sociale.doc>
- Atta A. C. J., Soulemane O., Yao K. A., Kasse K. B., Yaokokéré-Béibro K. H., 2016. Characterization of Human-Elephant Conflicts in the Department of Sikensi (South East Côte d'Ivoire). *Agronomie Africaine*, 28 (3): 30-41. <https://www.ajol.info/index.php/aga/article/view/164154>
- Blanárová L., 2017. Retours du terrain – Utilisation d'outils digitaux de collecte de données-Link NCA en Haïti. Méthode pour mener une analyse causale de la sous-nutrition, 3 p. [https://docpdf.linknca.com/159/159/supports/24796/cat-Doc231/article\\_kobotoolbox\\_fr\\_24\\_mai.pdf?CFID=29445470&CFTOKEN=99cdfd454980b2b6-BD532A49-D4B7-B832-65E00D-758D3A71ED](https://docpdf.linknca.com/159/159/supports/24796/cat-Doc231/article_kobotoolbox_fr_24_mai.pdf?CFID=29445470&CFTOKEN=99cdfd454980b2b6-BD532A49-D4B7-B832-65E00D-758D3A71ED)
- Bossaert M., Delauge J., Prudhomme O., Quidoz M.-C., 2015. Présentation de solutions gratuites pour la collecte d'observations/suivi de la biodiversité. Aten, Pool de ressource et compétence pour la nature. Site Web. <https://fr.readkong.com/page/presentation-de-solutions-gratuites-pour-la-collecte-6447778>
- Boukoulou H., Mbete P., Mbete R., Ngokaka C., Akouango F., Klaid Rhaysaint Excelh B., et al., 2012. Conflit Homme-Éléphant : étude de cas dans le village Miélékouka au Nord du Parc national d'Odzala Kokoua (Congo). *Journal of Applied Biosciences*, 50: 3478-3484. <https://www.m.elewa.org/IABS/2012/50/3.pdf>
- Boyle C., 2010. Text 911 to Elephants! How text messaging elephants can save their own lives. *Earth in Transition*, 2 p. <https://www.earthintransition.org/2010/11/text-911-to-elephants/>
- Chen J., Deng X., Zhang L., Bai Z., 2006. Diet composition and foraging ecology of Asian elephants in Shangyong, Xishuangbanna, China. *Acta Ecologica Sinica*, 26 (2): 309-316. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1872203206600061>
- Chhem R. D., 2016. Guide méthodologique : les technologies numériques pour faciliter la recherche en anthropologie. Département d'Anthropologie, Faculté des sciences sociales, Université Laval, 52 p. <https://www.fss.ulaval.ca/anthropologie>
- Fairet E. M. M., 2012. Vulnerability to crop-raiding: an interdisciplinary investigation in Loango National Park. Ph.D. thesis, Durham University, 218 p. <http://etheses.dur.ac.uk/6399/>
- Gamage A., Wijesundara M., 2014. A Solution for the Elephant-Human Conflict. Texas Instruments India Educators Conference, 169-176. <https://www.researchgate.net/publication/316175763>
- Graham M. D., Adams W. M., Kairo G. N., 2011. Mobile phone communication ineffective Human-Elephant conflict management in Laikipia County, Kenya. *Oryx*, The International Journal of Conservation, 46: 137-144. <https://doi.org/10.1017/S0030605311001104>
- Graham M. D., Douglas-Hamilton I., Adams W., Lee P., 2009. The movement of African elephants in a human-dominated land-use mosaic. *Animal Conservation*, 12: 445-455. <https://zslpublications.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1469-1795.2009.00272.x>
- Graham M. D., Notter B., Adams W. M., Lee P.C., Ochieng, T. N., 2010. Patterns of crop-raiding by elephants, *Loxodonta africana*, in Laikipia, Kenya, and the management of Human-Elephant conflict. *Systematics and Biodiversity*, 8: 435-445. <https://doi.org/10.1080/14772000.2010.533716>
- Gubbi S., 2012. Patterns and correlates of Human-Elephant conflict around a south Indian reserve. *Biological Conservation*, 148: 88-95. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.01.046>
- Hema E. M., Sirima D., Niagabarè B., Nama N., Petrozzi F., Di Vittorio M., et al., 2018. Raiding or not raiding? A study of the ecological correlates of Human-Elephant conflict around the Nazinga Game Ranch, Burkina Faso. *Revue d'Ecologie (Terre et Vie)*, 73 (1): 3-11. [https://www.researchgate.net/publication/316171255\\_Raiding\\_or\\_not\\_raiding\\_A\\_study\\_of\\_the\\_ecological\\_correlates\\_of\\_human-elephant\\_conflict\\_at\\_Nazinga\\_Game\\_Ranch\\_Burkina\\_Faso](https://www.researchgate.net/publication/316171255_Raiding_or_not_raiding_A_study_of_the_ecological_correlates_of_human-elephant_conflict_at_Nazinga_Game_Ranch_Burkina_Faso)
- Hoare R. E., 1999. A standardised data collection and analysis protocol for Human-Elephant conflict situations in Africa. Nairobi: IUCN African Elephant Specialist Group, 42 p. [file:///C:/Users/DELL/Downloads/A\\_Standardised\\_Data\\_Collection\\_and\\_Analysis\\_Protoc20\(2\).pdf](file:///C:/Users/DELL/Downloads/A_Standardised_Data_Collection_and_Analysis_Protoc20(2).pdf)
- Hoare R. E., 2001. Data collection and analysis protocol for Human-Elephant conflict situations in Africa. IUCN/SSC AfESG, Nairobi, 37 p.
- Hoare R. E., 2007. Protocole de collecte de données et d'analyse des situations de conflits Hommes-Éléphants en Afrique. UICN, 40 p. <http://www.hwctf.org/IUCN%20African%20Elephant%20Specialist%20Group%20Data%20collection%20and%20analysis%20protocol%20for%20human%20elephant%20conflict%20situations%20in%20Africa%20French.pdf>
- Inogwabini B. I., Mbende L., Bakanza A., Bokika J. C., 2013. Crop damage done by elephant in Malebo region, Democratic Republic of Congo. *Pachyderm*, 54: 59-69. <https://pachydermjournal.org/index.php/pachyderm/article/download/340/298>
- Jayson E. A., Christopher G., 2008. Human-Elephant conflict in the southern Western Ghats: A case study from Peppara wildlife sanctuary, Kerala, India. *Indian Forester*, 134: 1309-1325. <http://www.indiaenvironmentportal.org.in/files/Human%20elephant%20conflict.pdf>
- Kalyanasundaram R., Ramakrishnan B., Saravanamuthu R., 2014. Crop Damage by Asian Elephants *Elephas maximus* and Effectiveness of Mitigating Measures in Coimbatore Forest Division, South India. *International Research Journal of Biological Sciences*, 3 (8): 1-11. [https://www.researchgate.net/publication/264556982\\_Crop\\_Damage\\_by\\_Asian\\_Elephants\\_Elephas\\_maximus\\_and\\_Effectiveness\\_of\\_Mitigating\\_Measures\\_in\\_Coimbatore\\_Forest\\_Division\\_South\\_India](https://www.researchgate.net/publication/264556982_Crop_Damage_by_Asian_Elephants_Elephas_maximus_and_Effectiveness_of_Mitigating_Measures_in_Coimbatore_Forest_Division_South_India)
- Kobon S., Souleman O., Atta C.-J., Assemien C. J., Koua N'zi D., N'Guessan K. M., 2022. Conflits Homme-Éléphant dans la zone périphérique de la Réserve de Faune d'Abokouamékro (Centre Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 16 (2) : 669-679. <https://www.ajol.info/index.php/ijbcs/article/view/227921>

- Kouao M. L., Koffi Bene J.-C., Djaha Koffi A., Akpatou-Kouame B., Kone I., 2018. Characterization of wildlife damage at the periphery of the Tanoe-Ehy Swamp Forest in south-eastern Côte d'Ivoire. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 12 (4): 1717-1730. <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v12i4.16>
- Le Bel S., Chavernac D., Mapuvire G., Cornu G., 2014. Frontlines as an Early Warning Network for Human-Wildlife Mitigation: Lessons Learned from Tests Conducted in Mozambique and Zimbabwe. *Electronic Journal on Information Systems in Developing Countries*, 60 (6): 1-13. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/j.1681-4835.2014.tb00427.x>
- Le Bel S., Chavernac D., Stansfield F., 2015. Promoting a Mobile Data Collection System to Improve HWC Incident Recording: A Simple and Handy Solution for Controlling Problem Animals. In: *Problematic wildlife: a cross-disciplinary approach*. Angelici Francesco M. (eds). Springer International Publishing, 395-411. [https://publications.cirad.fr/une\\_notice.php?dk=579207](https://publications.cirad.fr/une_notice.php?dk=579207)
- Lewis A. L., Baird T. D., Soric M. G., 2016. Mobile Phone Use and Human-Wildlife Conflict in Northern Tanzania. *Environmental Management*, 58: 117-129. <https://doi.org/10.1007/s00267-016-0694-2>
- Liebenberg L. W., Blake E., Steventon L. W., Benadie K., Minye J., 1998. Integrating Traditional Knowledge with Computer Science for the Conservation of Biodiversity. Paper presented at the 8th International Conference on Hunting and Gathering Societies, CHAGS8, Osaka, 9 p. [https://www.academia.edu/26636448/Integrating\\_Traditional\\_Knowledge\\_with\\_Computer\\_Science\\_for\\_the\\_Conservation\\_of\\_Biodiversity](https://www.academia.edu/26636448/Integrating_Traditional_Knowledge_with_Computer_Science_for_the_Conservation_of_Biodiversity)
- Liebenberg L. W., Steventon L. W., Benadie K., Minye J., 1999. Rhino Tracking with the CyberTracker Field Computer. *Pachyderm*, 27: 59-61. <https://cybertracker.org/downloads/tracking/Liebenberg-1999-Rhino-Tracking-Pachyderm.pdf>
- Lingaraju H. G., Venkataramana G., 2016. An assessment of Human-Elephant conflict (HEC): a case study of Bandipur National Park, Karnataka, India. *Journal of Wildlife Research*, 4 (2): 26-31. [https://www.semanticscholar.org/paper/An-assessment-of-human-elephant-conflict-\(HEC\)%3A-a-Lingaraju-Venkataramana/b6659bd3205315b5aa1a9e113aeeee10aafe348#citing-papers](https://www.semanticscholar.org/paper/An-assessment-of-human-elephant-conflict-(HEC)%3A-a-Lingaraju-Venkataramana/b6659bd3205315b5aa1a9e113aeeee10aafe348#citing-papers)
- Liu P., Wen H., Harich F. K., He C., Wang, L., Guo X., et al., 2017. Conflict between conservation and development: cash forest encroachment in Asian elephant distributions. *Scientific Reports*, 7 (1): 6404. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06751-6>
- Liu P., Wen H., Lin L., Liu J., Zhang L., 2016. Habitat evaluation for Asian elephants (*Elephas maximus*) in Lincang: conservation planning for an extremely small population of elephants in China. *Biological Conservation*, 198: 113-121. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.04.005>
- Manral U., Sengupta S., Ainul-Hussain S., Rana S., Badola R., 2016. Human-Wildlife Conflict in India: A Review of Economic Implication of Loss and Preventive Measures. *Indian Forester*, 142 (10): 928-940. <https://www.indianforester.co.in/index.php/indianforester/article/view/93647>
- Mavah G., Makoumbou C., Clark C., 2006. Étude des approches de solutions au conflit Homme-Éléphant en périphérie des implantations humaines: cas du village de KABO. *Projet de gestion des écosystèmes périphériques au Parc de national Nouabalé Ndoki (PROGEPP)*, Ministère de l'Économie Forestière et de l'Environnement, République du Congo, 19 p. [https://carpe.umd.edu/sites/default/files/publications/5030002\\_SE\\_Human-Elephant\\_Conflict\\_Proposed\\_Methodology\\_Mavah\\_2006.pdf](https://carpe.umd.edu/sites/default/files/publications/5030002_SE_Human-Elephant_Conflict_Proposed_Methodology_Mavah_2006.pdf)
- Mayer R., Figueredo K., Jensen M., Kely T., Green R., Barra A., 2008. Costing the Needs for Investment in ICT Infrastructure in Africa. Summary of Background Paper 3, 11 p. <https://www.eu-africa-infrastructure-tf.net/attachments/library/aicd-background-paper-3-ict-invst-summary-en.pdf>
- Mishra C., Allen P., McCarthy T., Madhusudan M. D., Bayarjargal A., Prins H. H. T., 2003. The role of incentive programs in conserving the snow leopard. *Conservation Biology*, 17 (6): 1512-1520. <https://www.jstor.org/stable/3588899>
- Mishra S. R., Sethy J., Bisht H. K., 2015. Study on Human-Elephant Conflict in Baripada Division of, Mayurbhanja, Odisha, India. *Journal of Wildlife Research*, 3 (3): 21-26. [http://jakraya.com/journal/pdf/8-jwrArticle\\_1.pdf](http://jakraya.com/journal/pdf/8-jwrArticle_1.pdf)
- Morawczynski O., Miscione G., 2008. Examining trust in mobile banking transactions: The case of M-PESA in Kenya. In: *Social Dimensions Of Information And Communication Technology Policy*. Avgerou C., Smith M. L., van der Besselaar P. (eds). International Federation for Information Processing (IFIP), Springer, Boston, 282: 287-298. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-84822-8\\_19](https://doi.org/10.1007/978-0-387-84822-8_19)
- Nath N. K., Lahkar B. P., Brahma N., Dey S. P., Das J. P., Sarma K. P. K., et al., 2009. An assessment of Human-Elephant conflict in Manas National Park, Assam, India. *Journal of Threatened Taxa*, 1 (6): 309-316. <https://threatenedtaxa.org/index.php/JoTT/article/view/385>
- Naughton-Treves L., 1998. Predicting patterns of crop raiding by wildlife around Kibale National Park, Uganda. *Conservation Biology*, 12 (1): 156-168. <https://www.jstor.org/stable/2387471>
- Ngama S., 2018. Introduction to elephant ecophysiology: principles, methods and case studies on forest elephant (*Loxodonta cyclotis*) crop raiders in Gabon. PhD thesis, Life Sciences, Environmental Sciences & Ecology, 120 p. <http://hdl.handle.net/2268/225855>
- Nsonsi F., 2018. Human-Elephant (*Loxodonta cyclotis*) conflicts: a challenge to involve local communities in wildlife conservation. *Tropicicultura*, 36 (3) : 531-538. [https://www.researchgate.net/publication/328488915\\_Human-elephant\\_Conflicts\\_Loxodonta\\_cyclotis\\_A\\_Challenge\\_to\\_Involve\\_Local\\_Communities\\_in\\_Wildlife\\_Conservation](https://www.researchgate.net/publication/328488915_Human-elephant_Conflicts_Loxodonta_cyclotis_A_Challenge_to_Involve_Local_Communities_in_Wildlife_Conservation)
- Nyemgah Wo-Ndong L., 2009. Analyse du conflit Homme-Éléphant (*Loxodonta africana africana*) au Parc national de la Benoué et dans sa périphérie Est (Cameroun). Université de Dschang, Cameroun, Mémoire online, 150 p. [https://www.memoireonline.com/01/13/6707/m\\_Analyse-du-conflit-homme-elephant-Loxodonta-africana-africana--au-Parc-National-de-la-Benoue-e.html](https://www.memoireonline.com/01/13/6707/m_Analyse-du-conflit-homme-elephant-Loxodonta-africana-africana--au-Parc-National-de-la-Benoue-e.html)
- Olajide V., 2019. Data collection with Kobotoolbox. *Data Management and Data Analysis (Data Collection: Kobo toolbox)*. S.A.L.T Training/Workshop, 40 p. <https://www.researchgate.net/publication/335147345>
- Oli M. K., 1994. Snow leopards and a local human population in a protected area: a case study from the Nepalese Himalaya. In: *Proceedings of the Seventh International Snow Leopard Symposium*. Fox J. L., Jizeng D. (eds). International Snow Leopard Trust, Seattle, Washington, 51-64.
- Ouattara F. A., Soulemene O., Nandjui A., Tondoh V., 2010. État des maraudes et des dégâts de cultures liés aux éléphants à l'ouest du secteur de Djouroutou dans le sud-ouest du Parc National de Taï (Côte d'Ivoire). *Pachyderm*, 47: 36-44. <https://pachydermjournals.org/index.php/pachyderm/article/download/209/170>

OSU OREME (Observatoire des Sciences de l'univers - Observatoire de Recherche Méditerranéen de l'Environnement), 2012a. Analyse de besoins en termes de collecte de données terrain, Guide Technique. OSU OREME, 25 p. [https://oreme.org/app/uploads/Carnet\\_terrain\\_OSU\\_4\\_Guide\\_Technique.pdf](https://oreme.org/app/uploads/Carnet_terrain_OSU_4_Guide_Technique.pdf)

OSU OREME (Observatoire des Sciences de l'univers - Observatoire de Recherche Méditerranéen de l'Environnement), 2012b. Analyse de besoins en termes de collecte de données terrain, Mise en place du questionnaire. OSU OREME, 6 p. [https://oreme.org/app/uploads/Carnet\\_terrain\\_OSU\\_3\\_Recommandations\\_par\\_categories.pdf](https://oreme.org/app/uploads/Carnet_terrain_OSU_3_Recommandations_par_categories.pdf)

Parker G. E., Osborn F. V., Hoare R. E., Niskanen L. S., 2007. Human-Elephant conflict mitigation: a training course for community-based approaches in Africa. Trainers manual. IUCN Species Survival Commission, African Elephant Specialist Group, Human-Elephant Conflict Task Force, 83 p. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.33810.45769>

Pretty J., 2002. People, livelihoods and collective action in biodiversity management. In: Biodiversity, Sustainability and Human Communities: Protecting Beyond the Protected. O'Riordan T., Stoll-Kleeman S. (eds). Cambridge University Press, 61-86.

Rao K. S., Maikhuri R. K., Saxena K. G., 2002. Crop damage and livestock depredation by wildlife: A case study from Nanda Devi Biosphere Reserve, India. Journal of Environmental Management, 66 (3): 317-327. <https://doi.org/10.1006/jema.2002.0587>

Renggli S., Schelbert V., Füllemann N., Brogan J., 2018. Facility Evaluation Tool for WASH in Institutions (FACET). Eawag aquatic research, Terre des hommes, 77 p. [https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/publikationen/SESP/FACET/FACET\\_Manual\\_EN\\_low.pdf](https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/publikationen/SESP/FACET/FACET_Manual_EN_low.pdf)

Shaffer L. J., Khadka K. K., Van Den Hoek J., Naithani K. J., 2017. Human-Elephant Conflict: A Review of Current Management Strategies and Future Directions. Frontiers in Ecology and Evolution, 6 (235): 12 p. <https://doi.org/10.3389/fevo.2018.00235>

Sidaway P., 2010. État des lieux des conflits Hommes-Faune sauvage autour de la forêt des marais Tanoe-Ehy en Côte d'Ivoire. Mémoire de Master, Université Montpellier 2 (France), 77 p. [https://www.academia.edu/1347120/hommes\\_faune\\_sauvage\\_autour\\_de\\_la\\_For%C3%AAt\\_des\\_Marais\\_Tano%C3%A9\\_Ehy\\_en\\_C%C3%B4te\\_dIvoire](https://www.academia.edu/1347120/hommes_faune_sauvage_autour_de_la_For%C3%AAt_des_Marais_Tano%C3%A9_Ehy_en_C%C3%B4te_dIvoire)

Sirima D., Kabore I., Hema E. M., Kabre B. G., 2020. Corrélats écologiques de dégâts d'éléphants et efficacités des techniques traditionnelles de refoulement : cas de la forêt classée de Niangoloko, Burkina Faso. International Journal of Biological and Chemical Sciences, 14 (1): 69-83. <https://www.ajol.info/index.php/ijbcs/article/view/194130/183378>

Sitati N. W., Walpole M. J., Leader-Williams N., 2005. Factors affecting susceptibility of farms to crop raiding by African elephants: using a predictive model to mitigate conflict. Journal of Applied Ecology, 42 (6): 1175-1182. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2005.01091.x>

Sitienei A. J., Jiwen G., Ngene S. M., 2014. Assessing the cost of living with elephants *Loxodonta africana* in areas adjacent to Meru National Park, Kenya. European Journal of Wildlife Research, 60: 323-330. <https://doi.org/10.1007/s10344-013-0789-5>

SMART (Spatial Monitoring and Reporting Tool), 2017. SMART: Guide de mise en route du SMART, 12 p. [https://abcg.org/files/documents/H.2%20FY14%20WCS-FRENCH\\_SMART-Brochure%20-2015.02.02.pdf](https://abcg.org/files/documents/H.2%20FY14%20WCS-FRENCH_SMART-Brochure%20-2015.02.02.pdf)

Stevenson R. D., Haber W. A., Morris R. A., 2003. Electronic field guides and user communities in the eco-information revolu-

tion. Conservation Ecology, 7 (1): 3. <https://ecologyandsociety.org/vol7/iss1/art3/>

Suresh G. K., Jayson E. A., 2016. Crop Damage by Wild Elephants (*Elephas maximus*) and Evaluation of a New Control Method (Chilli-Rope) in Thrissur District, Kerala. 28<sup>th</sup> Kerala Science Congress, Extended Abstracts, 2475-2489. [https://www.academia.edu/35929943/CROP\\_DAMAGE\\_BY\\_WILD\\_ELEPHANTS\\_ELEPHAS\\_MAXIMUS\\_AND\\_EVALUATION\\_OF\\_A\\_NEW\\_CONTROL\\_METHOD\\_CHILLI\\_ROPE\\_IN\\_THRISSUR\\_DISTRICT\\_KERALA](https://www.academia.edu/35929943/CROP_DAMAGE_BY_WILD_ELEPHANTS_ELEPHAS_MAXIMUS_AND_EVALUATION_OF_A_NEW_CONTROL_METHOD_CHILLI_ROPE_IN_THRISSUR_DISTRICT_KERALA)

Tekem Tessa S. C., Tiawoun S., 2008. État des lieux des connaissances et élaboration d'une stratégie de gestion des conflits Homme-Éléphants en Afrique centrale : Cas de La région de Waza-Logone Cameroun. WWF, 54 p.

Walker K. L., 2011. Labor Costs and Crop Protection from Wildlife Predation: The Case of Elephants in Gabon. Agricultural Economics, 43 (1): 61-73. <https://doi.org/10.1111/j.1574-0862.2011.00565.x>

Webber C. E., Sereivathana T., Maltby M. P., Lee P. C., 2011. Elephant crop-raiding and Human-Elephant conflict in Cambodia: crop selection and seasonal timings of raids. Oryx, 45: 243-251. <https://www.cambridge.org/core/journals/oryx/article/elephant-cropraiding-and-humanelephant-conflict-in-cambodia-crop-selection-and-seasonal-timings-of-raids/96DB-1167D35F8F4FCC1071DFE86763F0>

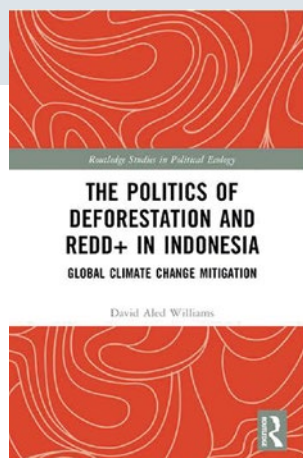
#### Mbani et al. – Credit authorship contribution statement

Contributor role	Contributor names
Conceptualization	S. Ngama, M. N. Tchamba, C. A. E. N'safou Mbani
Formal Analysis	C. A. E. N'safou Mbani, S. Ngama
Investigation	C. A. E. N'safou Mbani
Methodology	C. A. E. N'safou Mbani, S. Ngama
Resources	C. A. E. N'safou Mbani, S. Ngama
Supervision	M. N. Tchamba, S. Ngama
Validation	S. Ngama, C. A. E. N'safou Mbani
Visualization	C. A. E. N'safou Mbani, S. Ngama
Writing – Original Draft Preparation	C. A. E. N'safou Mbani, S. Ngama, A. A. Shidiki
Writing – Review & Editing	C. A. E. N'safou Mbani, S. Ngama, A. A. Shidiki, C. Gnacadja

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](mailto:bft@cirad.fr) - ISSN : L-0006-579X



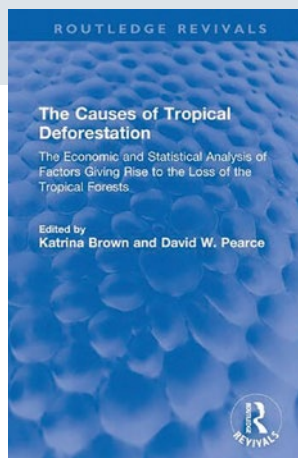
WILLIAMS D. A., 2023. **THE POLITICS OF DEFORESTATION AND REDD+ IN INDONESIA GLOBAL CLIMATE CHANGE MITIGATION.** UNITED STATES OF AMERICA, ROUTLEDGE, 162 P.

The book reflects on Indonesia's recent experience with REDD+ (Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation), all set within a broader discussion of neoliberal environmentalism, hyper-capitalism, and Indonesian carbon politics. Drawing on the author's political ethnographic fieldwork conducted in Jakarta, Central Sulawesi, and Oslo, where the author examined Norway's interests and role in implementing REDD+, this book discusses the long evolution of the idea that foreign state and private financing can be used to protect tropical forests and the carbon stored within them, resulting in both local economic development and global climate benefits. It shows how neoliberal environmental approaches to climate change, of which REDD+ is a leading example, increase the severity of political contestations that must be overcome to reach global climate mitigation goals, and how recent incarnations of REDD+ have tended to forget earlier scholarly advice to couple anti-deforestation approaches with policies that reduce industrial carbon emissions. In Indonesia, tectonic political and economic forces are shown to have negatively impacted REDD+ implementation. Using a political ecology approach, the book links the literature on REDD+ with that covering Indonesia's recent democratic regression, highlighting how the country's environmental performance is inextricably linked to the timbre of its political governance. Given the severity of the political contestations that must be overcome to reach its stated goals, REDD+ cannot replace global policies that drastically reduce industrial carbon emissions. This book will be of great interest to students and scholars of political ecology, deforestation, climate change, environmental politics, natural resource management, and environmental conservation.

*Abstract adapted from the publisher's abstract.*

Taylor & Francis, 2385 Executive Center Drive Suite 320, Boca Raton, FL 33431, USA.

[www.routledge.com](http://www.routledge.com)



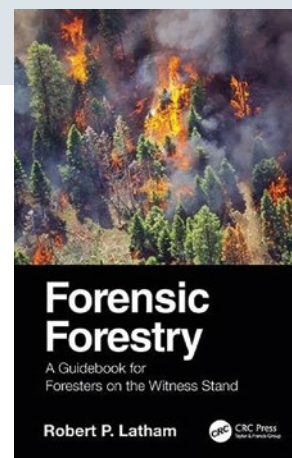
BROWN K., PEARCE D. W. (EDS), 2023. **THE CAUSES OF TROPICAL DEFORESTATION – THE ECONOMIC AND STATISTICAL ANALYSIS OF FACTORS GIVING RISE TO THE LOSS OF THE TROPICAL FORESTS – 1<sup>ST</sup> EDITION.** UNITED STATES OF AMERICA, ROUTLEDGE, 354 P.

*The Causes of Tropical Deforestation* (1994) is an analysis of the problem of deforestation, using statistical technique – a form of “environ-metrics” – to discover the true causes of an issue whose basis is hotly debated, and attributed to causes as varied as poverty, external debt, multinational logging companies, government corruption, the IMF, population growth, and non-sustainable agriculture.

*Abstract adapted from the publisher's abstract.*

Taylor & Francis, 2385 Executive Center Drive Suite 320, Boca Raton, FL 33431, USA.

[www.routledge.com](http://www.routledge.com)



LATHAM R. P., 2022. **FORENSIC FORESTRY: A GUIDEBOOK FOR FORESTERS ON THE WITNESS STAND.** UNITED STATES OF AMERICA, CRC PRESS, 144 P.

*Forensic Forestry: A Guidebook for Foresters on the Witness Stand* is a one-of-a-kind, hands-on resource for those forestry and land use professionals called upon to work on legal cases and testify in court. Land use and forestry issues in the United States, in particular – and likewise around the world – have become increasingly contentious, scrutinized, and debated. There is little to suggest that conflicts over forestlands will cease in the near future, in fact, quite the opposite. There are already a number of informative books available on land use and forestry, and related issues under the broader heading of environmental science. As such, while this book will not go into these concepts in detail, if someone is already an expert in land use and forestry, this book *will* tell them the ins and outs of the legal system and how they can best serve to make a case, using evidence, in a court of law. Coverage addresses the necessary background, and legwork involved, in providing technical expertise for such cases to be adjudicated. Since professionals' expertise is often focused on ecological issues, chapters look at the economic factors and how money, policy, and corporate interests come into play – the crux of where the professional forester's ability to present evidence and expertise becomes critical. The author provides an overall understanding of the courts, and the legal process. Coverage includes recommendations to professionals working on cases – and in the courtroom – in how to present evidence and testify in cases over land use and forestland rights, forestry management and safety, criminal and civil cases in liability in forest fires – among myriad others.

*Abstract adapted from the publisher's abstract.*

Taylor & Francis, 2385 Executive Center Drive Suite 320, Boca Raton, FL 33431, USA.

[www.routledge.com](http://www.routledge.com)



# Adopter des inventaires forestiers à dire d'acteurs pour les forêts communautaires camerounaises

**Apolline REBOUD<sup>1</sup>**  
**Liboum MBONAYEM<sup>2,3</sup>**  
**Guillaume LESCUYER<sup>2,4,5</sup>**

<sup>1</sup> Nitidae  
29 rue Imbert Colomes  
69001 Lyon  
France

<sup>2</sup> CIFOR  
BP 2008, Yaoundé  
Cameroun

<sup>3</sup> Rainforest Alliance  
Avenue Foe, rue 1307, N°38  
Yaoundé  
Cameroun

<sup>4</sup> CIRAD  
Forêts et Sociétés  
34398 Montpellier  
France

<sup>5</sup> Forêts et Sociétés  
Univ Montpellier, CIRAD  
Montpellier  
France

**Auteur correspondant /**  
**Corresponding author:**  
Apolline REBOUD –  
[a.reboud@nitidae.org](mailto:a.reboud@nitidae.org)



**Photo 1.**

Un agent du comité de surveillance de la zone de biodiversité dans la forêt communautaire (FC) de la Coopérative des Paysans de la Lékié (COPAL).  
*An agent of the monitoring committee for the biodiversity zone in the community forest of the Lékié Farmers' Cooperative (COPAL).*  
Photo A. Reboud.

Doi : 10.19182/bft2024.359.a37194 – Droit d'auteur © 2024, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 23 décembre 2022 ; date d'acceptation : 7 novembre 2023 ; date de publication : 29 février 2024.



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

**Citer l'article / To cite the article**

Reboud A., Mbonayem L., Lescuyer G., 2024. Adopter des inventaires forestiers à dire d'acteurs pour les forêts communautaires camerounaises. Bois et Forêts des Tropiques, 359 : 55-68. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2024.359.a37194>

## RÉSUMÉ

### Adopter des inventaires forestiers à dire d'acteurs pour les forêts communautaires camerounaises

La procédure officielle d'inventaire des ressources ligneuses pour les forêts communautaires camerounaises constitue un obstacle technique et financier majeur. Plusieurs études ont testé des démarches simplifiées mais sans jamais pouvoir proposer une alternative satisfaisante à la méthode standard d'inventaire, à savoir plus abordable financièrement et techniquement pour les populations locales, tout en étant statistiquement robuste. L'article récapitule la démarche et les résultats d'un inventaire forestier à dire d'acteurs, qui a été expérimenté dans une forêt communautaire de 4 800 ha, au couvert forestier dégradé. Cet inventaire repose sur cinq simplifications : (1) les seules espèces inventoriées sont celles vendues sur le marché domestique ; (2) les arbres inventoriés sont ceux situés à une distance inférieure à deux kilomètres d'une piste ou d'une rivière d'évacuation ; (3) seuls les arbres ayant un diamètre supérieur ou égal au diamètre minimum d'exploitabilité sont relevés ; (4) l'inventaire n'est réalisé qu'avec les propriétaires coutumiers volontaires ; (5) leur droit de possession coutumière sur les arbres est reconnu. Cet inventaire à dire d'acteurs a permis de recenser 3 885 arbres pour un volume de 19 297 m<sup>3</sup> dans la forêt communautaire. La quasi-totalité (93 %) de ces arbres sont situés en cacaoyères. La démarche est techniquement robuste puisque le taux de sondage est estimé au minimum à 35 %, et est donc largement supérieur à celui de l'inventaire forestier standard de 2 %. Cet inventaire est également économique puisque son coût revient à moins de 0,5 €/ha, c'est-à-dire moins de la moitié du coût d'un inventaire classique. Il est enfin socialement acceptable puisqu'il valorise les savoirs traditionnels et permet d'élaborer un mode d'exploitation des arbres favorable aux propriétaires coutumiers. Il incite ces derniers à la durabilité en leur permettant de devenir les principaux bénéficiaires de cette activité. Cette méthode paraît adaptée au contexte des forêts communautaires dégradées, mais son application à des forêts plus densément boisées mériterait d'être considérée.

**Mots-clés :** méthode d'inventaire forestier, forêt communautaire, foresterie sociale, arbres, bois, plan simple de gestion, Cameroun, Bassin du Congo, Afrique centrale.

## ABSTRACT

### Stakeholder-led inventories of community-managed forests in Cameroon

The official procedure for inventories of wood resources in Cameroon's community forests raises major technical and financial problems for the communities concerned. Several studies have tested simplified approaches but have never been able to propose a satisfactory alternative to the standard inventory method, i.e., one that is more affordable financially and technically for local populations, while remaining statistically robust. This article summarises the approach and results of a stakeholder-led forest inventory that was tested in a 4,800 ha community forest with degraded forest cover. The inventory method was simplified in five ways: (1) only species sold on the domestic market were counted; (2) only trees less than two kilometres away from a forest track or river were counted; (3) only trees with a diameter greater than or equal to the minimum logging diameter were counted; (4) the inventory was carried out with voluntary customary owners only; (5) their right to customary ownership of the trees was recognised. This inventory carried out by local stakeholders identified 3,885 trees in the community forest, with a total timber volume of 19,297 m<sup>3</sup>. Almost all (93%) of these trees were growing in cocoa plantations. The approach is technically robust since the sampling rate is estimated at a minimum of 35%, which is much higher than the standard forest inventory rate of 2%. The inventory is also economical, costing less than €0.5/ha, i.e., less than half the cost of a standard inventory. Lastly, it is socially acceptable because it makes good use of traditional knowledge, helps the community to develop logging methods that are favourable to customary owners, and thus encourages sustainability by enabling them to become the main beneficiaries of forest management. This method appears to be well suited to the context of degraded community forests, but it should also be considered for more densely wooded forests.

**Keywords:** forest inventory method, community forest, social forestry, trees, wood, simplified management plan, Cameroon, Congo Basin, Central Africa.

## RESUMEN

### Adopción de inventarios forestales con participación de actores locales para los bosques comunales cameruneses

El procedimiento oficial de inventario de recursos leñosos para los bosques comunales cameruneses constituye un importante obstáculo técnico y económico. Varios estudios han ensayado enfoques simplificados, aunque sin llegar a proponer una alternativa satisfactoria al método estándar de inventario, a saber, más abordable económica y técnicamente para las poblaciones locales, y estadísticamente fiable. Este artículo recapitula el planteamiento y los resultados de un inventario forestal realizado con los actores locales en un bosque comunitario de 4 800 ha, con cubierta forestal degradada. El inventario se basa en cinco simplificaciones: (1) las únicas especies inventariadas son las vendidas en el mercado doméstico; (2) los árboles inventariados son los situados a una distancia inferior a dos kilómetros de una pista o río de evacuación; (3) solo se tienen en cuenta los árboles con un diámetro superior o igual al diámetro mínimo de explotación; (4) el inventario solo se realiza con propietarios consuetudinarios voluntarios; (5) su derecho de tenencia consuetudinaria sobre los árboles está reconocido. El inventario realizado con los actores locales permitió censar 3 885 árboles en el bosque comunal, que producirían un volumen de madera total de 19 297 m<sup>3</sup>. La casi totalidad (93 %) de estos árboles se encuentran en cacaotales. El método es técnicamente satisfactorio, ya que la fracción de muestreo se ha estimado como mínimo del 35 %, y es ampliamente superior a la del inventario forestal estándar, del 2 %. Este inventario también es económico, ya que su coste es inferior a 0,5 €/ha, es decir, menos de la mitad del coste del inventario clásico. Finalmente, es socialmente aceptable, ya que valoriza los saberes tradicionales y permite elaborar un modo de explotación de los árboles que favorece a los propietarios consuetudinarios. Además, al permitirles convertirse en los principales beneficiarios de la actividad, los conciencia sobre la sostenibilidad. El método parece adaptado al contexto de bosques comunales degradados, aunque su aplicación a bosques más densamente arbolados merecería ser considerada.

**Palabras clave:** método de inventario forestal, bosque comunal, silvicultura social, árboles, madera, plan simple de gestión, Camerún, Cuenca del Congo, África Central.

## Introduction

Le Cameroun a été le premier pays d'Afrique centrale à introduire les forêts communautaires dans sa loi forestière en 1994. Toutefois, cette disposition réglementaire ne correspond pas à la reconnaissance des terroirs ancestraux des populations rurales (Burnham, 2000 ; Lescuyer *et al.*, 2013) ; mais elle permet à une ou plusieurs communautés de s'octroyer un droit formel de gestion sur une superficie maximale de 5 000 ha sur laquelle leurs droits coutumiers préexistent. L'octroi d'une forêt communautaire (FC) à une population et sa gestion subséquente requièrent de suivre plusieurs étapes et de respecter de nombreuses exigences qui sont énoncées dans un manuel des procédures dont la dernière édition remonte à 2009 (Ministère des forêts et de la faune du Cameroun, 2009).

Ce modèle de foresterie communautaire fait face à de très nombreuses limites, qui sont documentées depuis vingt ans et synthétisées par Cuny (2011). Ce processus, qui dans son principe est censé être accessible aux communautés, est en fait compliqué et coûteux à mettre en œuvre : il nécessite l'appui systématique d'organismes extérieurs ou d'élites souvent peu scrupuleuses. Cela empêche l'appropriation du processus par les populations et entraîne des pratiques illégales. Malgré les presque 900 FC reconnues ou en cours de validation par l'administration chargée des forêts, moins de 30 FC sont fonctionnelles en 2023. De plus, parmi ces dernières, très peu opèrent dans le cadre strict de la légalité (Fomou *et al.*, 2017).

L'élaboration du Plan Simple de Gestion (PSG), selon la norme imposée par le manuel des procédures, est un obstacle majeur pour les populations rurales voulant solliciter puis gérer une FC. La rédaction de ce document combine deux inconvénients : d'une part, il nécessite de suivre une procédure complexe pour être validé (Cuny, 2011 ; Fomou *et al.*, 2017) et, d'autre part, il se construit sur des approches technico-scientifiques qui sont déconnectées des connaissances et des règles coutumières (Kimengsi et Bhusal, 2022). Ces procédures sont inadaptées pour aménager un petit espace rural à usages multiples (Vermeulen *et al.*, 2006).

La procédure d'inventaire multi-ressources, qui est exigée par le manuel des procédures, est révélatrice de ces difficultés. Elle ne fait que répliquer celle qui s'applique aux concessions forestières de large taille et exploitées par des entreprises industrielles. Certaines étapes, comme l'élaboration d'un plan de sondage utilisant des outils de Système d'information géographique (SIG) et de télédétection, la réalisation d'un inventaire multi-ressources, puis le traitement de ces informations et leur mise en forme pour le PSG, sont inaccessibles aux communautés tant d'un point de vue financier que technique et technologique.

Le coût de l'inventaire multi-ressources n'est jamais inférieur à 1 €/ha (Julve *et al.*, 2007 ; Vermeulen *et al.*, 2006), ce qui oblige à trouver un partenaire financier pour réaliser cette opération (Ezzine de Blas *et al.*, 2009). Or, même dans ce cas, le manque de temps, de moyens et de contrôle

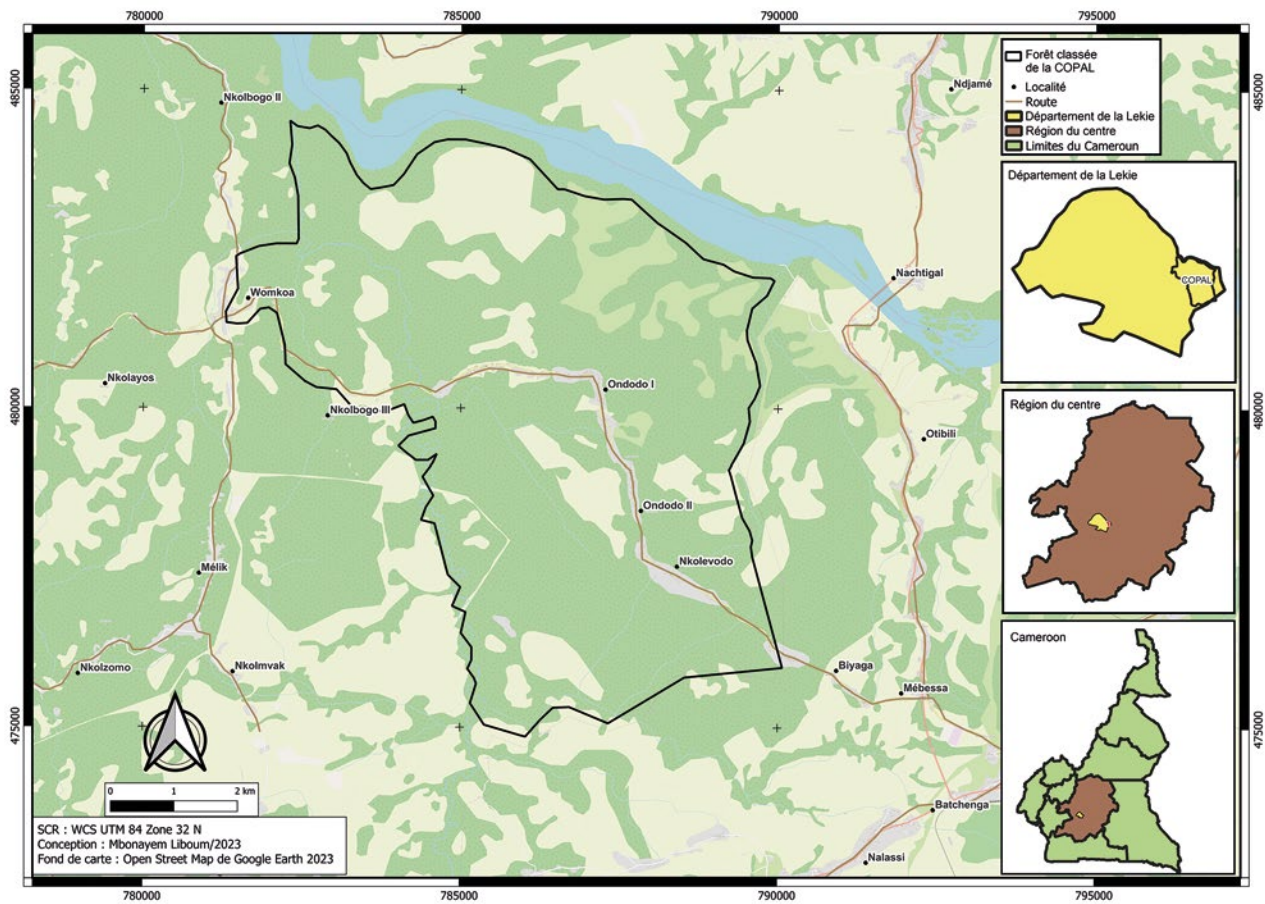
pousse l'organisme chargé de l'inventaire à un travail souvent superficiel (Kerkhofs *et al.*, 2013), notamment quand cet organisme ne dispose pas de l'agrément à la profession forestière, comme c'est largement le cas pour les FC (Fomou *et al.*, 2017). L'imposition de cette norme d'inventaire multi-ressources par l'administration dans le cadre de la rédaction du PSG conduit à des inventaires de qualité douteuse (Cuny, 2011 ; Kerkhofs *et al.*, 2013), quand ils ne sont pas tout simplement falsifiés. En outre, l'absence de contrôle par l'administration et la faible maîtrise de ce type d'information par les communautés empêchent que l'inventaire constitue un outil d'aide à la décision pour la gestion durable de la FC (Julve *et al.*, 2007).

Toutes ces limites techniques, s'expliquant par la réplification à une échelle bien plus petite des outils conçus pour l'aménagement durable des concessions forestières, appellent à des approches complémentaires – et non alternatives – qui soient adaptées aux forêts communautaires souvent dégradées. Ainsi, la remise en cause de ce type d'inventaire multi-ressources en FC a conduit à plusieurs essais de simplification des inventaires forestiers, qui sont récapitulés dans les paragraphes suivants.

Au Cameroun, Vermeulen *et al.* (2006) ont testé trois méthodes d'inventaire dans les forêts communautaires. La première méthode est un inventaire multi-ressources à 4 % qui intègrait, outre le relevé des essences commerciales (DME > 20 cm, diamètre minimum d'exploitabilité), celui des produits forestiers non ligneux (PFNL). La deuxième méthode a consisté à réaliser un inventaire d'exploitation en plein relevant l'ensemble des essences commerciales (produits forestiers non ligneux exclus) à un DME > 40 cm sur l'ensemble d'une forêt communautaire. D'un point de vue technique, la méthode d'inventaire d'exploitation en plein permettait de programmer l'exploitation des ressources en tenant compte des capacités réelles de production naturelle de la forêt. Mais cette approche restait cependant complexe et difficilement compréhensible pour les populations concernées. La troisième méthode a été l'inventaire à 100 % dans un cinquième (1/5) d'une FC. Bien que la troisième approche soit la moins coûteuse en temps et en argent, les sommes à consentir restent cependant très élevées pour une communauté villageoise.

Le projet DACEFI<sup>1</sup> avait pour objectif de rendre le processus de foresterie sociale et communautaire accessible aux communautés en Afrique centrale, notamment la phase d'inventaire forestier (Bracke *et al.*, 2008 ; Meunier *et al.*, 2013). Ainsi, seul un inventaire d'exploitation est réalisé, ce qui permet de garantir la connaissance, en quantité et en qualité, des ressources pour l'exploitation d'une unité d'exploitation de la FC. Cette méthode permet de s'affranchir des coûts d'investissement de l'inventaire, mais lors de sa réalisation, la durée des opérations est allongée, ce qui entraîne une augmentation des coûts de main-d'œuvre et une diminution de rendement. La qualité des informations collectées est satisfaisante (Bracke *et al.*, 2008) ; mais elle

<sup>1</sup> Développement d'Alternatives Communautaires à l'Exploitation Forestière Illégale (DACEFI).



**Figure 1.**  
 Carte de localisation de la forêt communautaire (FC) de la Coopérative des Paysans de la Lékié (COPAL).  
 Map showing the location of the community forest of the Lékié Farmers' Cooperative (COPAL).

ne permet pas la localisation des tiges commercialisables. En somme, cette méthode ne s'affranchit pas entièrement des inconvénients d'un inventaire classique.

D'autre part, dans le cadre du projet PRASAC<sup>2</sup>, un essai d'inventaire forestier simplifié a aussi été testé au Cameroun, notamment dans des zones dégradées telles que les savanes arborées, en adaptant la taille des placettes au type de zone inventoriée. Ainsi, les zones les plus boisées ont des placettes plus petites, avec un échantillonnage à 1 %, alors que les zones les moins boisées ont des placettes plus grandes avec un échantillonnage à 16 % (Gautier *et al.*, 2002). Cette méthode permet ainsi d'adapter le taux d'échantillonnage en fonction du volume de bois plutôt qu'en fonction de la surface inventoriée. Le coût de l'inventaire en est moindre, mais sa complexité est la même. De plus, le test de cette méthode a été effectué dans un contexte et dans un objectif bien différents puisqu'il s'agissait de déterminer la quantité de bois de chauffe disponible dans un écosystème de savane arborée au nord du Cameroun.

Enfin, Reboud *et al.* (2022) ont développé une méthode d'inventaire forestier basée sur des données à dire d'acteurs, et adaptée au contexte des FC dégradées.

Une vérification des dires d'acteurs a été effectuée avec la visite de leurs parcelles afin d'avoir une idée de la fiabilité des informations collectées auprès des détenteurs coutumiers. Il en est ressorti que ces derniers ont effectivement une idée des ressources ligneuses présentes dans leurs parcelles ; mais une différence d'au moins 20 % entre les dires des acteurs et les vérifications sur le terrain a été observée chez 40 % des personnes enquêtées. La limite de cette méthode est notamment de baser l'inventaire uniquement sur les dires des acteurs, alors que de nombreux propriétaires coutumiers n'ont qu'une connaissance approximative de la richesse de leurs parcelles en essences ligneuses commerciales.

Malgré les limites des démarches antérieures d'inventaire simplifié des ressources ligneuses, l'enjeu reste actuel pour les FC camerounaises pour deux raisons. D'une part, de multiples FC sont aujourd'hui localisées dans des zones forestières dégradées où la ressource ligneuse commercialisable se fait rare et où d'autres types d'usages sont privilégiés. Cette tendance historique ne justifie plus de consacrer une partie substantielle du coût de création et de gestion d'une FC dans des inventaires des ressources ligneuses dont l'exploitation n'apporte

<sup>2</sup> Pôle régional de Recherche Appliquée au développement des Systèmes agricoles d'Afrique Centrale (PRASAC).

que des revenus modestes aux communautés. D'autre part, l'exploitation artisanale des arbres dans les FC est orientée vers l'approvisionnement du marché intérieur du bois dont les exigences et les contraintes sont connues (Lescuyer *et al.*, 2016 ; Cerutti et Lescuyer, 2011) : leur prise en compte permet d'adapter un mode plus efficace de gestion de la ressource en amont de la chaîne de production.

Trois ensembles de variables méritent notamment d'être prises en compte pour ajuster l'inventaire des ressources ligneuses aux contraintes du mode d'exploitation artisanale du bois et à celles du marché domestique :

- La liste des essences à inventorier est établie sur la base de celles qui sont aujourd'hui vendues dans les marchés urbains du Cameroun, telles qu'observées sur la dernière décennie par Cerutti et Lescuyer (2011) et Lescuyer *et al.* (2016). Inventorier des espèces qui ne sont aujourd'hui pas commercialisées, c'est augmenter le coût de l'inventaire pour un bénéfice improbable.
- La distance d'exploitation des arbres pour des opérateurs artisanaux ne dépasse quasiment jamais une distance de deux kilomètres d'une voie d'évacuation, en raison du coût de transport des sciages (Cerutti et Lescuyer, 2011). Là aussi, inventorier des arbres situés à plus de deux kilomètres d'une piste ou d'une rivière, c'est augmenter le coût de l'inventaire pour une exploitation très peu probable.
- Les arbres abattus par les exploitants artisanaux font presque toujours l'objet de droit individuel de possession coutumière (Lescuyer *et al.*, 2013), qui doit être reconnu et valorisé pour favoriser un accès à la ressource qui soit socialement acceptable et promouvoir une répartition équitable des bénéfices de l'exploitation. L'inventaire gagne donc à relever à la fois les ressources ligneuses mais aussi les titulaires coutumiers de ces ressources.

Ces trois ensembles de variables inspirées des modalités actuelles de l'exploitation artisanale du bois et du fonctionnement du marché domestique, plutôt que découlant du seul objectif de maintien des populations des essences potentiellement exploitables, comme l'impose le manuel des procédures, permettent d'envisager d'autres options d'inventaire des ressources ligneuses dans les FC.

Partant de ces constats et de la prise en compte des limites des différents essais de simplification déjà réalisés, comment peut-on adapter la méthode d'inventaire forestier au contexte des forêts communautaires au Cameroun ? Cet article présente la démarche et les résultats d'une expérience d'inventaire à dire d'acteurs des ressources ligneuses. Après avoir introduit le site d'étude, la méthode de l'inventaire à dire d'acteurs des ressources ligneuses est présentée. Nous analysons ensuite les performances de cette démarche en étudiant son efficacité à préserver le stock de ressources ligneuses nécessaires à la poursuite de l'exploitation artisanale à long terme, son efficacité économique et son efficacité sociale. La discussion revient sur les avantages et les limites de cette démarche pour contribuer à l'évolution du modèle de la foresterie communautaire au Cameroun.

## Présentation de la zone d'étude

La forêt communautaire de la Coopérative des Paysans de la Lékié (COPAL) a officiellement vu le jour en janvier 2008 lorsque sa convention de gestion fut signée par l'administration en charge des forêts, sur la base d'un PSG qui avait été validé quelques mois auparavant. Cette FC est gérée par la COPAL qui existe depuis 2001 et qui fonctionne, selon la réglementation camerounaise, grâce à un Conseil d'administration représentant chacun des neuf villages impliqués.

Cette FC est située dans la région du Centre, et plus précisément dans le département de la Lékié, entre les latitudes (en degrés décimaux : 11,5340° ; 11,6126°) et les longitudes (en degrés décimaux : 4,2916° ; 4,3792°), à environ 60 km au nord de Yaoundé (figure 1). Elle couvre une superficie de 4 800 ha et combine plusieurs types d'espace : cacaoyères (1 143 ha), forêts majoritairement secondaires (1 010 ha), vieilles et jeunes jachères (970 ha), savanes (843 ha), champs vivriers (701 ha), zones d'habitation (114 ha) et collines (19 ha).

Malgré le profil forestier assez largement dégradé de cette FC, le PSG avait pour objectif principal l'exploitation du bois d'œuvre. D'autres usages comme la collecte des PNFL, l'exploitation du sable, l'agriculture vivrière ou la pêche artisanale sont également mentionnés dans le PSG, mais détiennent une place tout à fait secondaire. Les étapes initiales de création de cette FC ont été principalement financées par la SNV<sup>3</sup> (pour environ 12 200 €) et par le projet RICG<sup>4</sup> (pour environ 5 400 €) (Akoa Akoa, 2007). Ces fonds ont notamment permis l'inventaire des ressources présentes dans la FC qui a été réalisé en deux phases. Dans un premier temps, l'ONG APICA<sup>5</sup> a conduit l'inventaire d'aménagement des ressources ligneuses qui a été complété par un inventaire multi-ressources diligenté par l'ONG *Cameroon Ecology*.

L'exploitation en régie du bois d'œuvre a commencé en 2009 mais a connu rapidement des difficultés pour se conformer à la légalité, sans doute en raison d'un modèle économique fragile (Akoa Akoa, 2007). Dès 2010, l'exploitation informelle a pris le pas sur l'exploitation légale des arbres (Ndume Engone, 2013) avant de la supplanter totalement. En 2013, le conseil d'administration de la COPAL décidait de l'arrêt de l'exploitation légale du bois dans la FC, ce qui n'a pas empêché les exploitants artisanaux de poursuivre leur activité informelle.

Les premières années de la FC de la COPAL ont également permis de tester la démarche d'établissement des zones à Haute Valeur de Conservation (HCV) dans le cadre de la norme-label environnemental *Forest Stewardship Council*. Neuf zones HCV ont ainsi été identifiées dans la FC de la COPAL (Ahimin et Mbolo, 2010). Cet intérêt des communautés de la COPAL pour la conservation a permis, une dizaine d'années plus tard, d'initier une révision du PSG de la COPAL pour l'orienter davantage vers la préservation de la biodiversité (sur une superficie de 500 ha), la promotion du cacao durable, l'exploitation artisanale légale et l'agroforesterie fruitière. C'est dans le cadre de la révision du PSG que la méthode d'inventaire des ressources ligneuses à dire d'acteurs a été expérimentée (photo 1).

<sup>3</sup> SNV : Organisation Néerlandaise de Développement.

<sup>4</sup> RICG : Renforcement des Initiatives de Gestion des ressources forestières Communautaires et fauniques.

<sup>5</sup> APICA : Association pour la Promotion des Initiatives Communautaires Africaines.

## La méthode d'inventaire à dire d'acteurs

Les « experts » ont longtemps été les principaux pourvoyeurs de connaissances en matière de gestion des ressources naturelles (Cormier-Salem *et al.*, 2013). Mais le désengagement des États, l'organisation de la société civile et la décentralisation des pouvoirs a multiplié les acteurs, les points de vue et les sources de décision. Une vaste littérature démontre l'intérêt de s'appuyer sur les savoirs indigènes en matière d'utilisation des ressources et des espaces naturels en complément, voire parfois en substitution, des savoirs techniques figés sur des connaissances théoriques déconnectées des informations utiles pour la prise de décision par les communautés (Michon, 2000 ; Wiersum, 2000 ; Garcia et Lescuyer, 2008).

Dans cette perspective, la méthode d'inventaire à dire d'acteurs vise à aider les populations rurales pour réaliser une auto-analyse de leurs ressources et à élaborer une stratégie de gestion qui leur soit compréhensible, réaliste, valorisant leurs savoirs locaux et s'appuyant sur leurs institutions coutumières. Responsabilisées et valorisées par une formalisation de leur savoir et un renforcement de leur capacité d'analyse et d'action, les communautés s'expriment, décident et s'impliquent dans la gestion de leurs ressources (Clouet, 2000). De plus, cette approche

présente l'intérêt d'être peu coûteuse et donc davantage à la portée des communautés sans avoir à recourir à un opérateur extérieur.

Plusieurs cas ont montré l'intérêt de s'appuyer sur les dires d'acteurs locaux pour réfléchir au développement local (Tounsi *et al.*, 2008), élaborer des cartes d'aménagement du territoire (Clouet, 2000) ou inventorier la faune autour du parc national de Campo Ma'an au Cameroun (van der Hoeven *et al.*, 2004). Cet article teste la faisabilité de cette approche lorsqu'elle est appliquée à l'inventaire des ressources ligneuses sur une surface relativement petite et assez largement anthropisée.

Trois étapes ont été nécessaires pour conduire et analyser cet inventaire forestier à dire d'acteurs dans la FC de la COPAL : 1) les réunions d'information ; 2) la collecte des données ; 3) l'analyse des données d'inventaire.

### Réunions d'information

Dans chacun des villages de la COPAL, une réunion a été tenue pour expliquer la démarche envisagée et susciter l'intérêt des propriétaires coutumiers (photo 2). Ces réunions de sensibilisation étaient composées de trois parties.

La première partie consistait à présenter les avantages de la démarche : (1) reconnaissance des droits coutumiers sur les arbres et versement de 80 % du prix de l'arbre aux propriétaires coutumiers s'il est exploité ; (2) promotion



**Photo 2.**  
 Réunion d'information pour l'inventaire à dire d'acteurs.  
*Information meeting for the stakeholder inventory.*  
 Photo A. Reboud.



**Photo 3.**

Un détenteur coutumier près d'un fromager lors de la collecte des données.  
*A customary holder near a kapok tree during data collection.*  
Photo A. Reboud.

d'une exploitation légale des arbres, qui sera faite par des exploitants locaux qui en tireront des revenus durables ; (3) contribution à la COPAL dont la vocation est le développement socio-économique durable des villages. Les inconvénients à craindre de la démarche étaient aussi rappelés, comme de réveiller de vieux conflits familiaux sur la possession de ces espaces ou de ces ressources, ou sur les dommages sur les cacaoyers lors de l'exploitation des arbres.

La deuxième partie présentait les modalités pratiques de l'inventaire à dire d'acteurs, qui consiste à relever les arbres exploitables dans les parcelles des propriétaires coutumiers, en dehors de la zone de conservation de 500 ha établie dans la FC. Ces arbres doivent appartenir aux espèces vendues sur les marchés de Yaoundé, dont le diamètre dépasse 50 cm, le fût est droit, qui sont localisés à distance raisonnable d'une piste et sur lesquels les droits coutumiers individuels sont confirmés. Cet inventaire des arbres est réalisé par le propriétaire coutumier et un technicien du projet pour s'assurer du respect du protocole d'inventaire et pour géolocaliser la parcelle.

La troisième partie de la réunion indiquait que cet inventaire reposait sur des démarches volontaires des propriétaires coutumiers. Une fiche d'enregistrement des

propriétaires coutumiers volontaires était finalement laissée auprès du chef de village et des responsables des lignages afin d'identifier les personnes souhaitant faire enregistrer leurs arbres exploitables. L'implication des élites villageoises et familiales à ce stade de la démarche permet de limiter le risque d'identifier des propriétaires coutumiers illégitimes. Par ailleurs, les droits de possession individuelle sur les cacaoyères – et sur les arbres qui s'y trouvent – sont généralement très bien connus (Lescuyer *et al.*, 2013), surtout dans la région du Centre (Pédélahore, 2014) et ne font que rarement l'objet de contestation, sauf parfois au moment de l'héritage. La liste des propriétaires coutumiers volontaires a ensuite permis d'organiser la collecte des données sur le terrain.

### Collecte des données

Chaque propriétaire coutumier recevait la visite d'un technicien du projet pour aller inventorier les arbres exploitables sur ses terres. Le propriétaire coutumier pouvait détenir une ou plusieurs parcelles distinctes possédant des arbres exploitables (photo 3). La parcelle est définie comme un terrain d'un seul tenant et dominé par un seul usage (cacaoyère, jachère, champ vivrier, forêt). Un appareil

GPS (*Global Positioning System*) était utilisé pour lever les coordonnées géographiques de chaque parcelle inventoriée. Une corde étalonnée tous les 5 cm de diamètre à partir de 50 cm était utilisée pour mesurer le diamètre des tiges exploitables. Une feuille d'inventaire était remplie par parcelle, avec deux catégories d'information : (1) les caractéristiques du propriétaire coutumier (nom et prénom, âge, lignage, village) et (2) les caractéristiques de la parcelle (type d'espace, essences, diamètres, nombre d'arbres, durée de trajet à pied depuis la route, coordonnées géographiques). L'inventaire d'une parcelle durait entre cinq minutes et une heure et demie, en fonction de son éloignement par rapport au village et du nombre d'arbres exploitables présents. La durée moyenne d'inventaire par arbre était de 10 minutes (déplacement à l'intérieur de la parcelle, confirmation de l'essence, mesure du diamètre, prise de note).

### Analyse des données d'inventaire

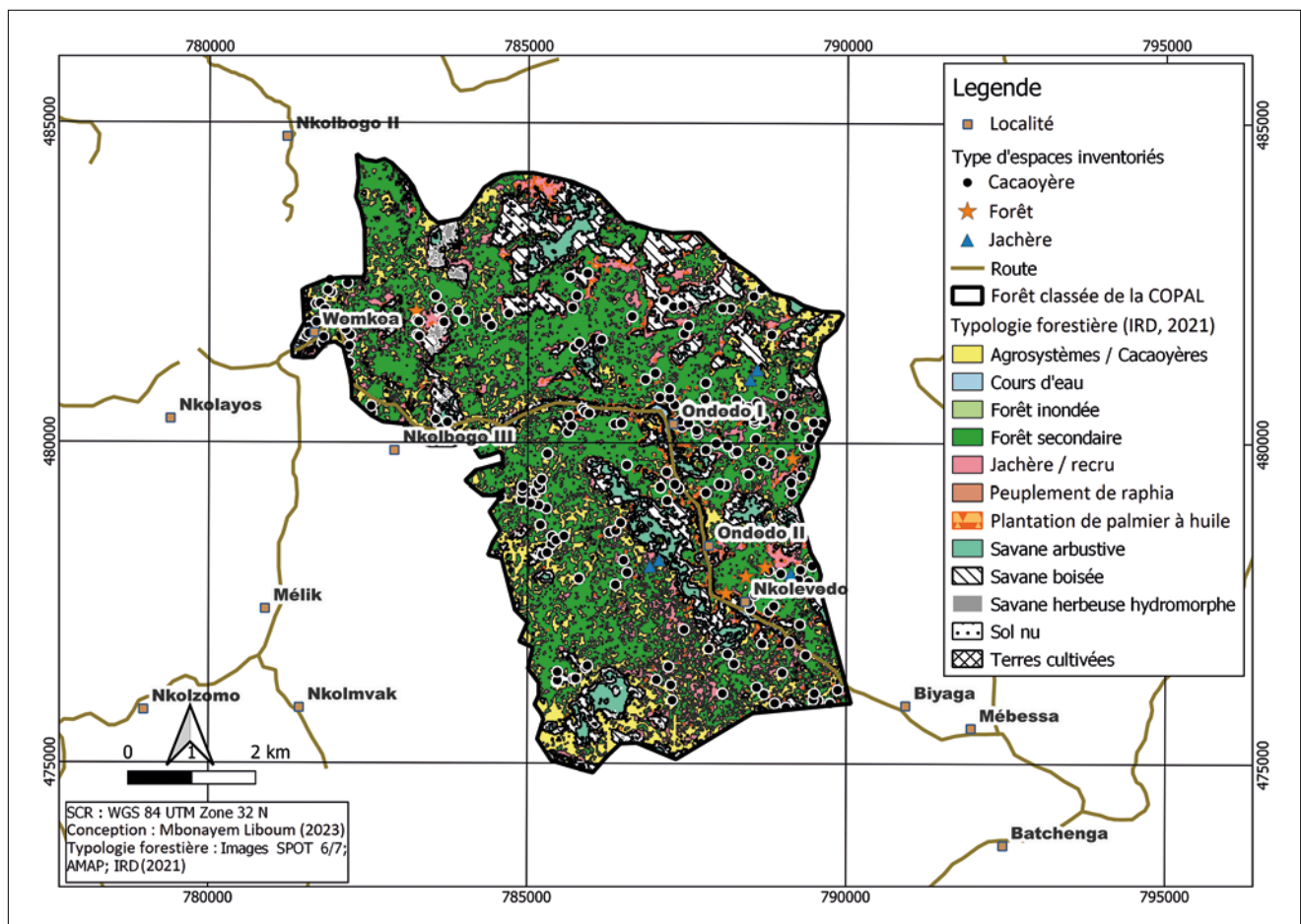
Les opérations de saisie sur ordinateur des données d'inventaire et leur analyse ont été produites au bureau, respectivement par un assistant de recherche et un ingénieur forestier.

Les coordonnées GPS relevées au cours de l'inventaire pour chaque parcelle permettaient d'analyser la répartition des arbres pour chaque type d'espace et d'en créer une carte de répartition des essences après une analyse avec le logiciel SIG QGIS (figure 2).

L'estimation du volume brut des arbres inventoriés s'appuyait sur les tarifs de cubage élaborés lors de l'inventaire forestier national entre 1982 et 1990 pour la région du Centre. C'est la formule de calcul du volume estimé  $V = a + b(D) + c(D)^2$ , avec  $D$  le diamètre,  $a$ ,  $b$  et  $c$  comme coefficients des tarifs de cubage, qui a été utilisée pour la plupart des essences rencontrées. Toutefois, l'azobé (*Lophira alata*), l'iroko (*Milicia excelsa*) et le kosipo (*Entandrophragma candollei*) ont des volumes estimés en utilisant la formule  $V = a + b(D)^2$ , avec  $D$  le diamètre,  $a$  et  $b$  comme coefficients dudit tarif de cubage. De même, le volume des espèces angongui (*Antrocaryon nannanii*), bete (*Mansonia altissima*), eyong (*Eribroma oblongum*), lotofa (*Sterculia rhinopetela*), movingui (*Distemonanthus benthamianus*) et pachyloba (*Azelia pachyloba*) a été évalué en recourant à la formule :

$$V = 1,858 + (-0,03518) \times (D) + 0,0010283 \times (D)^2$$

avec  $D$  le diamètre.



**Figure 2.**

Carte de localisation des espaces inventoriés suivant l'affectation des sols dans la forêt communautaire (FC) de la Coopérative des Paysans de la Lékié (COPAL). Source : Sagang et al., 2021.

Map showing the location of areas inventoried according to land use in the community forest of the Lékié Farmers' Cooperative (COPAL). Source: Sagang et al., 2021.



## Résultats

### Évaluation de la ressource ligneuse exploitable

Au terme de la réalisation de l'inventaire à dire d'acteurs, 3 885 arbres avec un diamètre supérieur au DME de 50 cm (Forni, 2001) ont été prospectés (tableau I).

Le volume brut de tiges exploitables obtenu des 3 885 tiges d'espèces forestières inventoriées est estimé à 19 297 m<sup>3</sup>. Cela correspond à 3 612 tiges exploitables et 17 971 m<sup>3</sup> (93,13 %) en zone cacaoyère, 154 tiges exploitables et 780 m<sup>3</sup> (4,04 %) en zone forestière et 119 tiges exploitables et 546 m<sup>3</sup> (2,82 %) dans les jachères.

L'abondance d'ezevang (*Ricinodendron heudelotii*) montre que cette forêt communautaire possède un fort potentiel en PFNL, qui pourraient générer des bénéfices supplémentaires aux communautés. Les espèces de bois d'œuvre les plus abondantes sont le frake (*Terminalia superba*), l'iroko (*M. excelsa*), le fromager (*Bombax ceiba*), le lotofa (*S. rhinopetala*), l'ilomba (*Pycnanthus angolensis*), l'azobe (*L. alata*), l'ayous (*Triplochiton scleroxylon*) et l'aïele (*Canarium schweinfurthii*).

### Des arbres exploitables surtout présents dans les cacaoyères

Une carte de typologie forestière de la FC a été réalisée par l'IRD<sup>6</sup> en 2019, selon la démarche de classification supervisée. Les parcelles inventoriées avec les propriétaires coutumiers ont été reportées sur cette carte afin d'en analyser la répartition spatiale et l'importance relative des types d'espaces dans la disponibilité de la ressource ligneuse exploitable (figure 2).

La présence d'arbres exploitables est confirmée sur la presque totalité de l'espace de la FC. Une telle répartition spatiale de ces ressources ligneuses s'explique par leur association presque systématique aux cacaoyères : sur 1 796 parcelles inventoriées, 1 684 (94 %) sont des cacaoyères, 60 (3 %) sont des bosquets forestiers, et 52 (3 %) sont des jachères et des champs. Il existe une difficulté technique importante à identifier ces cacaoyères à partir d'analyse d'images satellites car la plupart d'entre elles sont couvertes par des cimes fermées et peuvent, à tort, apparaître comme des forêts secondarisées.

### Fiabilité technique de l'inventaire à dire d'acteurs

Sachant que l'étude diagnostique de la COPAL réalisée par le CIFOR<sup>7</sup> en 2020 a dénombré 595 cacaoculteurs dans les 9 villages membres de la FC COPAL et qu'une superficie moyenne des cacaoyères est estimée à 2 ha et celle des jachères à 0,5 ha, nous pouvons simuler approximativement le taux de sondage réalisé pendant cet inventaire à dire d'acteurs dans le tableau II.

Quelles que soient les hypothèses, cette méthode d'inventaire à dire d'acteurs offre un taux de sondage supérieur à 30 %, donc largement supérieur aux taux de sondage

de 2 % appliqués suivant la procédure standard des inventaires multi-ressources au Cameroun. Cette méthode est donc particulièrement efficace quand les zones forestières sont dégradées.

### Efficacité économique de l'inventaire à dire d'acteurs

La réalisation d'une démarche standard d'inventaire forestier dans les FC est une dépense substantielle qui place les communautés en situation de dépendance vis-à-vis de partenaires intervenant en appui. Ce coût peut être réduit si l'inventaire est simplifié, sans perdre de sa fiabilité. Les dépenses occasionnées par l'inventaire à dire d'acteurs dans la FC de la COPAL sont reportées dans le tableau III. Le coût total avoisine 2 529 € pour une surface totale de la FC de 4 800 ha, soit un peu plus de 0,5 €/ha.

Le coût de l'inventaire à dire d'acteurs apparaît très compétitif si on le compare aux estimations établies pour les dispositifs d'inventaire testés par Vermeulen *et al.* (2006) à surface équivalente. De plus, notre évaluation intègre le coût salarial de la main d'œuvre « au bureau », contrairement aux estimations précédentes.

Cette démarche d'inventaire à dire d'acteurs permet également d'éviter les dépenses des inventaires d'exploitation puisque la ressource ligneuse est déjà évaluée exhaustivement et sans extrapolation.

Il est possible de réduire encore ce coût d'inventaire. D'une part, les techniciens de terrain peuvent assez facilement être remplacés par des habitants des villages formés au protocole d'inventaire et à la prise de coordonnées GPS, dont le coût salarial journalier est inférieur. D'autre part, à plus long terme, les gestionnaires des FC doivent pouvoir se doter des capacités à saisir eux-mêmes les données forestières, les analyser et les utiliser sans intermédiaire.

## Discussion

### Préciser le domaine d'application de l'inventaire à dire d'acteurs

L'intérêt de la méthode d'inventaire à dire d'acteurs pour des forêts plus densément boisées reste à démontrer. Ainsi reste-t-il à déterminer le niveau de dégradation forestière à partir duquel la méthode serait pertinente et à établir la méthode d'évaluation du niveau de dégradation. L'application de cette méthode d'inventaire dans la zone forestière anthropisée de la COPAL permet d'atteindre un taux de sondage avoisinant les 35 %, alors que le taux de sondage minimum suffisant pour renseigner sur la diversité des essences forestières dans les forêts communautaires est de 2 % selon la norme administrative actuelle. Il existe donc une vraie marge de manœuvre dans des forêts moins dégradées pour appliquer l'inventaire à dire d'acteurs tout en restant au-delà du taux de sondage plancher de l'inventaire forestier multi-ressources.

Une autre limite tient au fait que l'inventaire à dire d'acteurs ne permet pas de prendre en compte la courbe

<sup>6</sup> Institut de Recherche et Développement.

<sup>7</sup> Center for International Forestry Research.

**Tableau I.**

Nombre de tiges inventoriées et volume exploitable ( $\phi \geq 50$  cm) par espèce forestière, où DME est le diamètre minimum d'exploitabilité.  
Number of stems inventoried and exploitable volume ( $\phi \geq 50$  cm) by forest species, where DME is the minimum exploitable diameter.

Nom commun	Nom scientifique	Tiges $\geq$ DME (en cacaoyère) (en nombre de tiges) <sup>a</sup>	Volume $\geq$ DME (en cacaoyère) (en m <sup>3</sup> ) <sup>b</sup>	Tiges $\geq$ DME (en forêt) (en nombre de tiges) <sup>c</sup>	Volume $\geq$ DME (en forêt) (en m <sup>3</sup> ) <sup>d</sup>	Tiges $\geq$ DME (en jachère) (en nombre de tiges) <sup>e</sup>	Volume $\geq$ DME (en jachère) (en m <sup>3</sup> ) <sup>f</sup>	Nombre total de tiges $\geq$ DME (en nombre de tiges) <sup>a+c+e</sup>	Volume total $\geq$ DME (en m <sup>3</sup> ) <sup>b+d+f</sup>
Abale	<i>Petersianthus macrocarpus</i>	1	4					1	4
Abam à poil rouge	<i>Gambeya beguei</i>	4	18					4	18
Acajou	<i>Khaya ivorensis</i>	5	28					5	28
Aiele	<i>Canarium schweinfurthii</i>	90	484	4	22	9	50	103	556
Angongui	<i>Antrocaryon nannanii</i>	2	9					2	9
Aningre A.*	<i>Pouteria altissima</i>	1	7					1	7
Aningre R.**	<i>Pouteria aningeri</i>	3	13					3	13
Ayous	<i>Triplochiton scleroxylon</i>	203	1 062			5	26	208	1 088
Azobe	<i>Lophira alata</i>	185	801	20	125	11	50	216	976
Bete	<i>Mansonia altissima</i>	14	40					14	40
Bibolo	<i>Lovoa trichilioides</i>	1	6					1	6
Bilinga	<i>Nauclea diderrichii</i>	5	22			3	8	8	30
Dabema	<i>Piptadeniastrum africanum</i>	10	43	3	13			13	56
Emien	<i>Alstonia boonei</i>	127	551	6	25	8	30	141	606
Eveuss	<i>Klainedoxa gabonensis</i>	16	69	1	6	2	9	19	84
Eyong	<i>Eribroma oblongum</i>	10	32					10	32
Ezezag	<i>Ricinodendron heudelotii</i>	487	2 708	16	90	15	67	518	2 865
Frake	<i>Terminalia superba</i>	580	2 490	24	104	11	49	615	2 643
Fromager	<i>Ceiba pentandra</i>	526	4 062	8	55	9	59	543	4 176
Ilomba	<i>Pycnanthus angolensis</i>	347	1 485	15	66	22	97	384	1 648
Iroko	<i>Milicia excelsa</i>	553	2 374	10	49	14	60	577	2 483
Kossipo	<i>Entandrophragma candollei</i>	1	3					1	3
Koto	<i>Pterygota macrocarpa</i>	14	62					14	62
Lati	<i>Amphimas ferrugineus</i>	3	13					3	13
Lotofa	<i>Sterculia rhinopetala</i>	217	661	9	31	3	10	229	702
Movingui	<i>Distemonanthus benthamianus</i>	5	18	3	17			8	35
Pachyloba	<i>Azelia pachyloba</i>	76	328	8	37	2	9	86	374
Padouk	<i>Pterocarpus soyauxii</i>	44	174	11	44			55	218
Sapelli	<i>Entandrophragma cylindricum</i>	1	3					1	3
Tali	<i>Erythrophleum ivorense</i>	55	275	16	96	5	22	76	393
latandza	<i>Albizia ferruginea</i>	23	106					23	106
Zingana	<i>Microberlinia bisulcata</i>	3	20					3	20
<b>Total</b>		<b>3 612<sup>a</sup></b>	<b>17 971<sup>b</sup></b>	<b>154<sup>c</sup></b>	<b>780<sup>d</sup></b>	<b>119<sup>e</sup></b>	<b>546<sup>f</sup></b>	<b>a + c + e = 3 885</b>	<b>b + d + f = 19 297</b>

\* A. : ancien nom *Aningeria altissima*.\*\* R. : ancien nom *Aningeria robusta*.

de régénération des essences ligneuses, puisque seuls les arbres de diamètre supérieur au DME sont inventoriés. On peut alors s'interroger sur la durabilité de la gestion d'une forêt lorsque l'on ne prend pas en compte précisément sa régénération naturelle. Trois considérations permettent de relativiser cette crainte dans le cas de la FC de la COPAL. D'une part, l'inventaire à dire d'acteurs n'a été réalisé qu'avec les propriétaires coutumiers volontaires, et au moins un tiers des propriétaires n'a pas participé à cet exercice. Les parcelles de ces derniers ne seront donc pas exploitées, ce qui contribue à maintenir la ressource ligneuse sur pied, dont probablement des arbres semenciers. D'autre part, la distance maximale de ces inventaires est de 2 km à vol d'oiseau d'une piste d'évacuation, ce qui laisse aussi de vastes espaces où les essences ligneuses

seront préservées. Enfin, l'inventaire à dire d'acteurs n'a pas été conduit dans la zone de conservation de 500 ha établie dans la FC. Cet espace héberge également de nombreux arbres des essences ligneuses commerciales et contribue à garantir la pérennité de ces ressources à long terme.

Par sa vocation et son adaptation aux capacités des gestionnaires locaux, l'inventaire à dire d'acteurs n'est donc pas substituable à la méthode classique d'inventaire forestier, qui garde toute sa pertinence sur de grandes surfaces ou sur de gros volumes de bois exploitables. Toutefois, ce type d'inventaire simplifié pourrait s'avérer pertinent à petite échelle, même dans des massifs plus densément boisés, par exemple quand l'exploitation du bois n'est qu'une activité secondaire de la FC.

**Tableau II.**

Simulation du taux de sondage de l'inventaire à dire d'acteurs dans la forêt communautaire de la Coopérative des Paysans de la Lékié (COPAL).  
*Simulation of the sampling rate for the stakeholder inventory in the community forest of the Lékié Peasant Cooperative (COPAL).*

Superficie totale de la FC (ha) (A)	Nombre de cacaoyères	Surface moyenne d'une cacaoyère (ha)	Superficie couverte par les cacaoyères (B) (ha)	Nombre de jachères	Surface moyenne d'une jachère (ha)	Superficie couverte par les jachères (C) (ha)	Superficie totale couverte 1 (ha) ((B + C) = D)*	Taux de sondage simulé 1 (D/A)**	Superficie totale couverte 2 (ha) ((B/2+C) = E)***	Taux de sondage simulé 2 (E/A)****
4 800	1 684	2	3 368	52	0,5	26	3 394	70,71	1 710	35,63

\* Superficie totale couverte 1 = Surface totale couverte par l'inventaire à dire d'acteurs hors forêt pour une moyenne de 2 ha/cacaoyère (ha).  
 \*\* Taux de sondage simulé 1 = Taux de sondage simulé pour 2 ha de surface moyenne des cacaoyères.  
 \*\*\* Superficie totale couverte 2 = Surface totale couverte par l'inventaire à dire d'acteurs hors forêt pour une moyenne d'1 ha/cacaoyère.  
 \*\*\*\* Taux de sondage simulé 2 = Taux de sondage simulé pour 1 ha de surface moyenne des cacaoyères.

**Tableau III.**

Estimation du coût de réalisation d'un inventaire participatif dans une forêt communautaire dégradée.  
*Estimation of the cost of conducting a participatory inventory in a degraded community forest.*

Catégorie de coût	Quantité	Coût unitaire (Franc CFA*)	Coût total (Franc CFA)
<b>Main d'œuvre - Techniciens (jour)</b>	120	7 500	900 000
<b>Main d'œuvre - Propriétaires coutumiers (jour)</b>	120	2 000	240 000
<b>Déplacement - Techniciens</b>	60	1 000	60 000
<b>Petit équipement (pile, stylo, corde, etc.)</b>	forfait		120 000
<b>Multiplification des fiches</b>	500	50	25 000
<b>Imprévus</b>	90	500	45 000
<b>Déplacement - Dépôt des fiches</b>	3	10 000	30 000
<b>Main d'œuvre - Saisie des fiches</b>	396	200	79 200
<b>Main d'œuvre - Analyse des données (jour)</b>	4	40 000	160 000
<b>Total</b>			<b>1 659 200</b>

\* Franc CFA ou XAF : franc de la coopération financière en Afrique centrale émis par la Banque des États de l'Afrique centrale pour les six États membres de la Communauté économique et monétaire de l'Afrique centrale (CEMAC).

### Accompagner la polyvalence des usages dans les forêts classées

L'inventaire à dire d'acteurs permet d'estimer le volume exploitable de bois d'œuvre dans la FC COPAL aux environs de 16 430 m<sup>3</sup>, si on exclut l'ezezag (*R. heudelotii*) qui serait maintenue pour la production de PFNL. Ramené à la durée de 25 ans d'une FC, ce volume permet une exploitation annuelle de 657 m<sup>3</sup>, soit autour de 300 m<sup>3</sup> de sciages en exploitation artisanale à destination du marché intérieur. En outre, la bonne connaissance de l'état des ressources ligneuses exploitables dans la FC, grâce à un inventaire en plein chez les propriétaires coutumiers volontaires, offre une capacité d'adaptation qui permet de réagir de manière rapide aux évolutions des demandes.

Ce volume de production de sciages est compatible avec les ambitions et les moyens de la FC COPAL. D'un côté, il est

largement suffisant pour couvrir les capacités locales d'exploitation artisanale, puisqu'une quinzaine d'exploitants artisanaux sont intéressés par cette activité à temps partiel dans les villages de la COPAL (Mbonayem *et al.*, 2020). Mais, d'autre part, cette possibilité moyenne d'exploitation indique que l'exploitation du bois ne peut plus être considérée comme une action majeure de cette FC : elle ne fournira plus un volume d'activité ou des revenus permettant d'impacter de manière significative les conditions de vie de ces ménages ruraux. Les résultats de cet inventaire à dire d'acteurs montrent que la FC doit être considérée autrement que comme une zone d'exploitation du bois d'œuvre. Ils appellent à concevoir une autre vision de la FC : celle d'un espace inscrit dans une trajectoire de développement durable et qui soutient des options variées de développement. Cette nouvelle configuration ouvre une réelle flexibilité à l'exploitation du bois d'œuvre, dont le volume de production peut dorénavant s'adapter au niveau des demandes et non plus être établi sur la base du revenu nécessaire – car unique – à fournir à la FC.

### Reposer sur de faibles exigences techniques

La méthode nécessite des capacités techniques minimales. Le matériel se restreint à un appareil GPS, une corde étalonnée tous les 5 cm de diamètre à partir de 50 cm, un ordinateur et comme connaissances techniques, des capacités simples de calcul suffisent. Il reste nécessaire d'avoir un appui extérieur, au moins au démarrage par la formation des personnes en charge de l'inventaire. Après une formation rapide, il est facile de substituer les « experts » d'organisations extérieures par un technicien des eaux et forêts accompagné des détenteurs des champs à inventorier. L'appui en question reste minime par rapport à l'appui pour un inventaire classique. Il est d'ailleurs possible de former une personne du village pour la levée des coordonnées GPS des tiges exploitables et pour l'analyse simplifiée des données d'inventaire. Enfin, la période de réalisation de l'inventaire est flexible car elle tient compte de l'agenda des ayants droits coutumiers.

### Valoriser les droits coutumiers d'accès aux ressources

La difficile intégration des droits, des savoirs et des institutions coutumiers dans les PSG a constitué un frein important à l'appropriation et à l'efficacité des FC au Cameroun (Vermeulen *et al.*, 2011 ; Cuny, 2011). L'inventaire à dire d'acteurs pallie en partie cette lacune, à trois étapes de la gestion des ressources ligneuses.

Tout d'abord, les populations sont directement impliquées dans la collecte des données qui devient une démarche simple et compréhensible. Chaque propriétaire coutumier peut ainsi voir le bénéfice qu'il peut tirer d'une exploitation organisée de ses ressources et se responsabiliser. Ce type d'inventaire permet de documenter puis de valoriser les droits individuels coutumiers attachés à certaines ressources même dans une démarche de gestion en commun de l'espace de la FC. Toutefois, l'identification précise des ressources ligneuses appartenant à chaque

propriétaire coutumier peut également le pousser à vouloir valoriser rapidement ce capital sur pied en le vendant à des « scieurs sauvages », et non dans le cadre plus formel et sécurisé de la FC.

Ensuite, l'identification systématique des ayants droits coutumiers permet de réviser la clef de répartition des revenus tirés de l'exploitation du bois en faveur des propriétaires de ces ressources. En effet, si de nombreux PSG prévoient effectivement une rétribution financière des propriétaires coutumiers pour les arbres abattus, celle-ci est généralement basse, autour de 10 % (Poissonnet *et al.*, 2006). La reconnaissance et l'inventaire des possessions individuelles coutumières des arbres entraînent une meilleure valorisation de ce mode de gestion par une rémunération plus élevée. La FC COPAL a ainsi adopté une clef de répartition des revenus tirés de la vente des arbres qui privilégie les propriétaires coutumiers (80 %) tout en contribuant aux coûts généraux de gestion de la forêt communautaire (20 %). Cette décision constitue une incitation prometteuse pour motiver les propriétaires coutumiers à la gestion de leurs arbres.

Enfin, l'inventaire à dire d'acteurs permet de planifier une rotation de l'exploitation des arbres qui soit agencée par villages. Chaque quota annuel d'exploitation est ainsi accordé dans un village particulier selon un volume compatible avec les ressources inventoriées dans chacun des espaces lignagers puis individuels concernés. Cette organisation spatiale de l'utilisation des ressources ligneuses a beaucoup plus de sens que celle qui agrège des assiettes annuelles d'exploitation dont les limites sont déconnectées des repères topographiques et sociaux des terroirs villageois et lignagers. Même largement simplifiée et construite sur les perceptions et connaissances locales, cette démarche novatrice d'exploitation des arbres nécessite probablement un appui initial aux responsables de la FC pour la mettre en place et démontrer en pratique ses avantages aux yeux des populations.

## Conclusion

La méthode de l'inventaire à dire d'acteurs des ressources ligneuses présente de nombreux avantages par rapport au protocole imposé par les normes réglementaires, surtout quand il s'agit de forêt communautaire (FC) dont le couvert forestier est dégradé.

Les difficultés majeures rencontrées par la foresterie communautaire au Cameroun depuis une bonne décennie et le retrait des financements internationaux sur cette thématique appellent à une réforme de l'approche déployée à la fin des années 1990 et réitérée en 2009 avec la seconde édition du manuel des procédures de gestion des FC. Des innovations techniques, comme l'inventaire forestier à dire d'acteurs, peuvent contribuer à rouvrir le débat et discuter des solutions à la portée des communautés. Cela nécessiterait que l'administration décide d'actualiser le manuel des procédures de gestion des FC, comme elle l'a fait en 2009, et en profitant de la soumission prochaine d'un nouveau code forestier aux parlementaires camerounais.

La réforme de la foresterie communautaire n'est pas seulement un enjeu technique : elle permettrait aussi de montrer que les exigences réglementaires ne sont pas avant tout le produit d'acteurs techniques ou institutionnels qui trouveraient un intérêt à complexifier le processus de foresterie communautaire afin de décourager les communautés de s'y engager, comme cela a été exprimé à plusieurs reprises (Vermeulen, 2000 ; Ezzine de Blas *et al.*, 2008 ; Julve *et al.*, 2013). Élaborer des outils simples de gestion et de suivi des FC, valoriser les savoirs et pratiques paysannes, ou inscrire les FC dans des perspectives de développement durable et intégré constituent des opportunités de relancer et de relégitimer la foresterie communautaire au Cameroun, et plus largement en Afrique centrale.

### Remerciements et contributions

Les auteurs remercient Édouard Essiane Mendoula pour la saisie informatique des données et Gaël Bounougou pour la collecte et la coordination de la collecte des données sur le terrain. Ils remercient également Ghislain Fomou pour sa relecture d'une première version de cet article et Fabrice Bénédet pour le formatage final de la base de données afin de la déposer dans un entrepôt numérique Dataverse. Les contributions de deux relecteurs anonymes ont également permis d'améliorer le contenu et la lisibilité de cet article.

### Financement

Cette recherche a été entreprise à l'aide du financement par la Nachtigal *Hydro Power Company* (NHPC) dans le cadre de son Plan de Gestion Environnementale et Sociale et de son Plan d'Actions Biodiversité, qui encadrent les mesures de compensation des impacts du Projet d'Aménagement Hydroélectrique de Nachtigal-Amont au Cameroun.

### Accès aux données

Lescuyer G., Mbonayem L., Reboud A., 2023. Inventaire à dire d'acteurs des ressources ligneuses de la Forêt communautaire COPAL (Cameroun). CIRAD Dataverse. <https://doi.org/10.18167/DVN1/GBFYDQ>

## Références

Ahimin A. O., Mbolu M., 2010. Process in the high conservation value (HCV) concept within community-managed forests: case study of COPAL and BB community forests in Cameroon. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management*, 12: 215-237. <https://doi.org/10.1142/S1464333210003577>

Akoa Akoa R. J., 2007. Economic analysis of community forest projects in Cameroon. PhD. Thesis, University of Göttingen, 105 p. <https://agritrop.cirad.fr/550164/>

Bracke C., Schippers C., Ntchandi-Otimbo P.-A., Demarquez B., Bonneau O., Doucet J.-L., 2008. Rendre les inventaires forestiers accessibles aux populations. *In* : Les Premières Forêts Communautaires du Gabon – Récits d'une expérience pilote. Vermeulen C., Doucet J.-L. (eds). *Projet DACEFI*, Imprimeur, Belgique, 240 p. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/21913>

Burnham P., 2000. Whose Forest? Whose Myth? Conceptualisation of Community Forests in Cameroon. *In*: Land, Law and Environment: Mythical Land, Legal Boundaries. Abramson A., Theodossopoulos D. (eds). Pluto Press, 31-58. <https://doi.org/10.2307/j.ctt18fs63f>

Cerutti P. O., Lescuyer G., 2011. Le marché domestique du sciage artisanal au Cameroun : état des lieux, opportunités et défis. *CIFOR Document Occasionnel 59*, Bogor, Indonésie, 56 p. [https://www.cifor.org/publications/pdf\\_files/OccPapers/OP-59.pdf](https://www.cifor.org/publications/pdf_files/OccPapers/OP-59.pdf)

Clouet Y., 2000. Le zonage à dire d'acteurs. Méthodes et perspectives. *Bois et Forêts des Tropiques*, 265 : 45-57. <https://revues.cirad.fr/index.php/BFT/article/view/20037>

Cormier-Salem M. C., Lescuyer G., Takforyan A., 2013. Les paysans ont leurs raisons que les experts ignorent. *In* : Rendre possible – Jacques Weber, itinéraire d'un économiste passe-frontières. Bouamrane M., Antona M., Barbault R., Cormier-Salem M.-C. (coord.). *Collection Indisciplines*, Quae, Paris, 53-61.

Cuny P., 2011. État des lieux de la foresterie communautaire et communale au Cameroun. *Tropenbos International*, 67 p. <https://www.yumpu.com/fr/document/view/48050389/etat-des-lieux-de-la-foresterie-communautaire-et-communale-au->

Ezzine de Blas D., Ruiz Pérez M., Sayer J. A., Lescuyer G., Nasi R., Karsenty, A., 2009. External influences on and conditions for community logging management in Cameroon. *World Development*, 445-456. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2008.03.011>

Fomou G., Vandenhoute M., Feuilio D. S., 2017. Légalité et traçabilité des bois des forêts communautaires du Haut-Nyong. *FAO SAILD*, 56 p. <https://www.saild.org/wp-content/uploads/2018/01/Rapport-de-l%C3%A9tude-SVCL-6.pdf>

Forni E., 2001. Détermination des principaux paramètres d'aménagement avec prise en compte des essences peu connues. *In* : Seminar proceedings "Sustainable management of African rain forest", held in Kribi, Cameroon, November 1999 – Part I: Workshops. Foahom B. Jonkers W. B. J., NKWi P. N., Schmidt P., Tchatat M. (eds). *The Tropenbos Foundation*, 94-105.

Garcia C., Lescuyer G., 2008. Monitoring, Indicators and Community-Based Forest Management in the Tropics: pretexts or red herrings? *Biodiversity and Conservation*, 17: 1303-1317. <https://doi.org/10.1007/s10531-008-9347-y>

Gautier D., Ntoupka M., Karr N., 2002. Un exemple de protocole d'inventaire forestier au niveau d'un terroir villageois. *Gestion des ressources*, PRASAC, 2 p. [https://agritrop.cirad.fr/561424/1/document\\_561424.pdf](https://agritrop.cirad.fr/561424/1/document_561424.pdf)

Julve Larrubia C., Marc V., Vermeulen C., Bérénice C., Ekodeck H., Delvingt W., 2007. Séduisante théorie, douloureuse pratique : la foresterie communautaire camerounaise en butte à sa propre législation. *Parcs Réserves*, 62 (2) : 18-24. [https://wwfeu.awsassets.panda.org/downloads/txt18\\_foresteriecommunautaireloisforestiere\\_20080422.pdf](https://wwfeu.awsassets.panda.org/downloads/txt18_foresteriecommunautaireloisforestiere_20080422.pdf)

Kerkhofs B., Julve C., Federspiel M., Vermeulen C., 2013. *Flegt in Community Forestry – Final report*. *Projet Appui à la mise en oeuvre du FLEGT dans les Forêts Communautaires – AFFC – Rapport final*. *Nature+*, Université de Liège.

Kimengsi J. N., Bhusal, P., 2022. Community Forestry Governance: Lessons for Cameroon and Nepal. *Society & Natural Resources*, 35: 447-464. <https://doi.org/10.1080/08941920.2021.2006844>

Lescuyer G., Cerutti P. O., Robiglio V., 2013. Artisanal chainsaw milling to support decentralized management of timber in Central Africa? An analysis through the theory of access. *Forest Policy and Economics*, 32: 68-77. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2013.02.010>

Lescuyer G., Tsanga R., Essiane Mendoula E., Ahanda B. X. E., Ouedraogo H. A., Fung O., et al., 2016. Demandes nationales de sciages : obstacle ou opportunité pour promouvoir l'utilisation des ressources forestières d'origine légale au Cameroun ? CIFOR, 74 p. <https://www.cifor.org/knowledge/publication/6332/>

Mbonayem L., Bassanaga S., Guizol P., Mendoula E. E., Lescuyer G., 2020. Étude diagnostic rural de la coopérative des paysans de la Lekie (COPAL) (Rapport technique). CIFOR, Projet COPAL.

Meunier Q., Vermeulen C., Boldrini S., Moumbogou C., Mezui Mba C., Doucet J.-L., 2013. Fiche technique du projet DAFECI-2 : La pratique des inventaires multi-ressources dans les forêts communautaires, ou comment rendre la foresterie communautaire inaccessible aux villageois. DAFECI-2, 4: 1-7. <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/145593/1/Fiche%20technique%20n%C2%B04%20-%20Normes%20vs%20Inventaires.pdf>

Michon G., 2000. Indigenous Forestry: How to Turn Localised Knowledge into a Relevant Forestry Science. In: *Forestry, Forest Users and Research: New Ways of Learning*. Lawrence A. (ed.). ETRN, Wageningen, the Netherlands, 33-43. [http://www.gip-ecofor.org/doc/drupal/etfrn\\_series\\_1.pdf](http://www.gip-ecofor.org/doc/drupal/etfrn_series_1.pdf)

Ministère des forêts et de la faune du Cameroun, 2009. Manuel des procédures d'attribution et des normes de gestion des forêts communautaires. CARPE, 51 p. <https://www.ceja.ch/images/CEJA/DOCS/Bib/Pays/Cameroun/BG.pdf>

Ndume Engone H. C., 2013. Analyse financière des impacts de l'exploitation du bois d'œuvre dans les économies villageoises du Sud-Cameroun. Mémoire de Master II, AgroParisTech, Montpellier, 101 p.

Pédélahore P., 2014. Systèmes agroforestiers à cacaoyers et transition capitaliste : l'exemple du Centre-Cameroun. *Bois et Forêts des Tropiques*, 321 : 55-66. <https://revues.cirad.fr/index.php/BFT/article/view/BFT321-55-66>

Poissonnet M., Parmantier A., Wyngaarde B., Bifane Elle E., Demenois J., Lescuyer G., 2006. Espoirs et difficultés du transfert de la gestion forestière à deux communautés de Guyane et du Cameroun. *Bois et Forêts des Tropiques*, 289, 5-16. <https://revues.cirad.fr/index.php/BFT/article/view/20309>

Reboud A., Lescuyer G., Mbona Yem L., 2022. Expérimentation d'une approche innovante pour évaluer les ressources ligneuses dans les forêts communautaires dégradées au Cameroun. Congrès Forestier Mondial des 2-6 mai 2022, Séoul.

Sagang T. B., Mofack G., Sonke B., Couteron P., Barbier N., 2021. Rapport final de l'analyse du couvert végétal dans la zone de construction du barrage et les zones de compensation : COPAL et parc national du Mpem et Djim. NHPC, IRD, AMAP, LABOSYSTE, Montpellier, 44 p.

Tounsi K., Gammoudi L., Clouet Y. 2008. Le zonage à dires d'acteurs : un outil cartographique pour la confrontation des savoirs et pouvoirs endogènes et exogènes à propos du développement local : étude de cas en Tunisie centrale. *Sécheresse*, 19 (1) : 3-12. [https://publications.cirad.fr/une\\_notice.php?dk=544021](https://publications.cirad.fr/une_notice.php?dk=544021)

van der Hoeven C. A., de Boer W. F., Prins H. H. T., 2004. Pooling local expert opinions for estimating mammal densities in tropical rainforests. *Journal for Nature Conservation*, 12: 193-204. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2004.06.003>

Vermeulen C., Vandenhoute M., Dethier M., Ekodeck H., Nguenang G.-M., Delvingt W., 2006. De Kompia à Djolempoum : sur les sentiers tortueux de l'aménagement et de l'exploitation des forêts communautaires au Cameroun. *Vertigo*. <https://doi.org/10.4000/vertigo.2149>

Wiersum F., 2000. Incorporating Indigenous Knowledge in Formal Forest Management: Adaptation or Paradigm Change in Tropical Forestry? In: *Forestry, Forest Users and Research: New Ways of Learning*. Lawrence A. (ed.). ETRN, Wageningen, the Netherlands, 19-32. [http://www.gip-ecofor.org/doc/drupal/etfrn\\_series\\_1.pdf](http://www.gip-ecofor.org/doc/drupal/etfrn_series_1.pdf)

### Reboud et al. – Déclaration de contribution des auteurs du crédit

Rôle du contributeur	Noms des auteurs
Gestion des données	L. Mbonayem
Analyse formelle	L. Mbonayem
Méthodologie	A. Reboud, L. Mbonayem, G. Lescuyer
Gestion de projet	G. Lescuyer
Supervision	G. Lescuyer
Validation	G. Lescuyer
Visualisation	A. Reboud
Écriture – Préparation de l'ébauche originale	A. Reboud, L. Mbonayem, G. Lescuyer
Écriture – Révision et édition	A. Reboud, L. Mbonayem, G. Lescuyer

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](mailto:bft@cirad.fr) - ISSN : L-0006-579X

# Pollen indices of *Cedrus atlantica* Manetti populations vary with geographical localities in the Moroccan Atlas Mountains

**Codou SENGHOR<sup>1</sup>**  
**Fatima-Ezzahra SAOUAB<sup>1</sup>**  
**Mohammed BENDRISS AMRAOUI<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Sidi Mohamed Ben Abdellah  
University  
Faculty of Sciences Dhar el Mahraz,  
Department of Biology  
Laboratory of Biotechnology,  
Environment, Food and Health  
(LBEFH)  
P.O. Box 1796, Atlas, Fez  
Morocco

**Auteur correspondant /  
Corresponding author:**  
Mohammed BENDRISS AMRAOUI –  
[mohamed.bendrissamraoui@  
usmba.ac.ma](mailto:mohamed.bendrissamraoui@usmba.ac.ma)

**Photo 1.**  
Mature tree  
*Cedrus atlantica* Manetti  
on the edge of a forest track  
in the High Atlas Mountains  
of central-eastern Morocco.  
Photo M. Bendriss Amraoui.



**Doi :** 10.19182/bft2024.359.a37273 – Droit d’auteur © 2024, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 23 octobre 2023 ;  
date d’acceptation : 6 février 2024 ; date de publication : 29 février 2024.



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

## Citer l’article / To cite the article

Senghor C., Saouab F.-E., Bendriss Amraoui M., 2024. Pollen indices of *Cedrus atlantica* Manetti populations vary with geographical localities in the Moroccan Atlas Mountains. Bois et Forêts des Tropiques, 359 : 69-83.  
Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2024.359.a37273>

## RÉSUMÉ

**Les indices polliniques des populations de *Cedrus atlantica* Manetti varient en fonction des localités géographiques dans les zones montagneuses de l'Atlas au Maroc**

Les forêts de *Cedrus atlantica* Manetti d'Afrique du Nord sont en forte régression, ayant décliné de plus de 58 % au cours des 130 dernières années, et de nombreux peuplements risquent de disparaître complètement dans les décennies à venir. Cette étude sur les interactions entre les caractéristiques du pollen de *C. atlantica* (production, germination et longueur du tube pollinique) et les paramètres de différentes localités au Maroc, menée sur soixante-dix individus issus de sept populations géographiquement éloignées, montre que les indices polliniques varient en fonction de la station. La production de pollen est élevée dans les populations des stations de Moudemam-1 et Seheb, intermédiaire dans les stations d'Ait Oufella et d'Ait Ayach et faible dans les stations de Zerrouka, Ras elma et Moudemam-2. La germination du pollen est très faible pour les populations des stations de Seheb et Moudemam-1, mais élevée dans les autres stations. D'autre part, les tubes polliniques les plus longs ont été enregistrés dans la population de Moudemam-1, alors que ceux des autres stations sont plus courts. Ces résultats montrent une variation inverse entre les indices polliniques caractérisant les populations des stations étudiées. Les classes de longueur des tubes polliniques les plus courts [0-100] à [300-400] représentent 85,98 % de l'ensemble des classes et ont pu être évaluées pour les stations de Zerrouka, Ait Oufella et Ait Ayach. Dans la population de Moudemam-1, les autres classes sont soit mieux représentées, soit présentes uniquement dans cette station. Ces résultats pourraient avoir des implications non seulement pour évaluer les variations polliniques en fonction des localités géographiques, mais aussi pour optimiser la fertilisation des forêts de cèdres en sélectionnant les meilleurs clones pour cette essence.

**Mots-clés :** *Cedrus atlantica*, cèdre, population, production, germination, pollen, longueur du tube pollinique, localité, Maroc, montagnes de l'Atlas.

## ABSTRACT

**Pollen indices of *Cedrus atlantica* Manetti populations vary with geographical localities in the Moroccan Atlas Mountains**

North Africa's forests of *Cedrus atlantica* Manetti have declined drastically, by more than 58% in the last 130 years, and many stands are likely to disappear entirely in the coming decades. This study on the interactions between *C. atlantica* pollen characters (production, germination, and pollen tube length) and locality characters in Morocco, using seventy individuals from seven geographically distant populations, showed that pollen indices varied according to station. Pollen production was high in the populations of the Moudemam-1 and Seheb stations, intermediate in the Ait Oufella and Ait Ayach stations, and low in the Zerrouka, Ras elma and Moudemam-2 stations. Pollen germination was very low for the populations in the Seheb and Moudemam-1 stations but high in the other stations. On the other hand, the longest pollen tubes were recorded in the Moudemam-1 population, while those in the other stations were shorter. These results show an inverse variation between the pollen indices characterizing the populations of the stations studied. The shortest pollen tube length classes [0-100] to [300-400] accounted for 85.98% of all classes and were assessed for the Zerrouka, Ait Oufella and Ait Ayach stations. The other classes were more represented or exclusive to the population of the Moudemam-1 station. These results could have implications not only for assessing pollen variations according to geographical localities but also for optimizing fertilization in cedar forests by selecting the best clones for this species.

**Keywords:** *Cedrus atlantica*, cedar, population, production, germination, pollen, pollen tube length, locality, Morocco, Atlas Mountains.

## RESUMEN

**Los índices de polen de poblaciones de *Cedrus atlantica* Manetti varían con las localidades geográficas de las montañas del Atlas en Marruecos**

Los bosques del Norte de África de *Cedrus atlantica* Manetti han disminuido drásticamente, más del 58 % en los últimos 130 años, y muchos rodales podrían desaparecer completamente en las próximas décadas. Utilizando 70 individuos de siete poblaciones distantes geográficamente, este estudio sobre las interacciones entre las características del polen de *C. atlantica* (producción, germinación y longitud del tubo polínico) y las características de la localidad de Marruecos, mostró que los índices de polen variaban según la localidad. La producción de polen era elevada en las poblaciones de las localidades de Moudemam-1 y Seheb; intermedia en Ait Oufella y Ait Ayach, y baja en Zerrouka, Ras elma y Moudemam-2. La germinación del polen era muy baja en las poblaciones de las localidades de Seheb y Moudemam-1, pero elevada en las demás localidades. Por otro lado, los tubos polínicos más largos se registraron en las poblaciones de Moudemam-1, mientras que los de las demás localidades eran más cortos. Estos resultados muestran una variación inversa entre los índices de polen que caracterizan a las poblaciones de las localidades estudiadas. Las clases de tubos polínicos más cortas, de [0-100] a [300-400], representan el 85,98 % del total de clases, y se evaluaron en las localidades de Zerrouka, Ait Oufella y Ait Ayach. Las demás clases fueron más representadas o exclusivas para la población de la localidad de Moudemam-1. Estos resultados podrían tener implicaciones no solamente para evaluar las variaciones de polen según las localidades geográficas, sino también para optimizar la fertilización en los bosques de cedro seleccionando los mejores clones para estas especies.

**Palabras clave:** *Cedrus atlantica*, cedro, población, producción, germinación, polen, longitud del tubo polínico, localidad, Marruecos, montañas del Atlas.



## Introduction

Gymnosperms are one of the most threatened groups of living organisms, with 40% of the species at high risk of extinction, about twice as many as the most recent estimates for all plants (i.e., 21.4%) (Forest et al. 2018). The Atlas cedar (*Cedrus atlantica* Manetti) is an endangered species endemic to the mountains of North Africa (Thomas, 2013). Due to its wide ecological range, it is attracting increasing international interest for its use in the reforestation of degraded lands (Lanier 1994; Ripert and Boisseau 1994; Labhar 1998; Schaad et al. 2018). Despite this, its range has undergone a considerable reduction in recent decades (Rhanem 2011; Thomas 2013; Schaad et al. 2018). Many threats greatly influence their survival, such as die-back, climate change, fires, and long-term browsing by domestic animals (Quezel and Medail 2003; Chaponniere and Smakhtin 2006; Belhassan et al. 2010; Rhanem 2011; El Jihad 2016; Bouahmed et al. 2019).

The cedar naturally forms seven geographical blocks in North Africa, including four in Morocco, occupying a surface area of 132,000 ha and representing 2.3% of the national forest. In Morocco, the cedar presents very heterogeneous ecological requirements (Maire, 1924; Emberger 1939; Pujos 1966; Lecompte 1969; Donadieu 1977; Achhal et al. 1980). According to edaphic, altitudinal, and climatic criteria, we distinguish, respectively among limestone dolomites and basalts, cedar forests at low (1,600-1,900 m), medium (1,900-2,100 m), and high (2,100-2,500 m) altitudes (Achhal et al. 1980). In the central Middle Atlas, two groups of the geological formations are distinguished by their morphological and phytoecological structure: the group of the tabular Middle Atlas Causse in the North living in subhumid or humid weather; and the group of the Middle Atlas pleated to the South with semi-arid climate (El Bakkali and Bendriss Amraoui 2022). In the High Atlas, cedar may develop in a semi-arid climate at a high altitude of 1,800-2,400 m between latitudes 32°16' and 32°53' (Rhanem 2011).

Several studies have reported that pollen traits condition reproductive success in competition, pollination, seed selection, and offspring quality (Van Breukelen 1982; Lord and Eckard 1984; Cruzan 1990; Gore et al. 1990; Manicacci and Barrett 1995; Delph et al. 1998). Similarly, pollen size and its protein resources have been found to be positively related to stigma depth (Roulston et al. 2000; Cruden 2009) and seed size in a wide range of species (Kirk 1993). Pollen tube size, which varies widely among species, is considered an excellent indicator of pollen viability and ability to fertilize the ovule (Zonia and Munnik 2008; Fayant 2010; Dardelle 2011).

The study of reproduction in *C. deodara* species has revealed a large variability in pollen and ovule characters (Johri and Vasil 1961; Chowdhury 1961; Konar and Oberoi 1969; Takaso and Owens 1995a, 1995b; Khanduri and Sharma 2002, 2009), as well as in the sexual expression of the tree depending on year, site, and tree size (Khanduri and Sharma, 2010;

Sharma and Bhondge 2016; Khanduri et al. 2021). Some limited studies have reported significant variability in pollen size of *C. atlantica* depending on several parameters, including site conditions, genome size, adaptations required for wind pollination, and irregular pollen development (Smith 1923; Derridj et al. 1991; Bell et al. 2017; Bell et al. 2018a, 2018b). Likewise, the pollen traits of the Atlas cedar have not been the subject of any other research despite the fact that its variability with the environment has been established by studies; hence, their capital importance for the regeneration, management, and conservation of the cedar forests in these regions (Bell et al. 2018a; Rhanem 2010, 2011). Similarly, among the few studies carried out in Algeria, especially on the physiological aspects of the Atlas cedar pollen, none have provided details on the pollen tube of this species, despite its significance as an excellent indicator of viability and ability to fertilize the ovule (Khanfouci 2005; Krouchi 2010).

The large variability in *C. atlantica* pollen grain size observed by Bell et al. (2017) within individual samples, in some cases by as much as 20 µm, suggests that grain pollen is influenced by a number of complex factors. Furthermore, providing insights into environmental conditions through the size and morphology of *C. atlantica* pollen at the time of development remains controversial until now due to (i) the variability of production, size, and morphology; (ii) the compromise size number; and (iii) the lack of evidence for climatic influence (Bell et al. 2017), underscoring the need for further investigation on cedar pollen grain.

The objective of this paper is to study the interaction of geographical position with pollen characteristics of seven natural populations of *C. atlantica* from Moroccan mountains.

## Material and Methods

### Study areas

In the High Atlas Mountains of central-eastern Morocco, the geographical limits of cedar are between the northern latitudes of 32°30' and 32°15' and the eastern longitudes of 4°24' to 5°33' (figure 1), at an altitude of between 1,900 and 3,250 m (Rhanem 2010). These cedar forests live in a continental semi-arid bioclimate and occupy an area of 10,000 ha (Rhanem 2010). In the Middle Atlas, the cedar occupies latitudes between 32°08' and 33°44' (Bariteau et al. 1999), altitudes between 1,600 and 2,500 m (Pujos 1966), and covers an area of 70,000 ha (Rhanem 2010) in a bioclimate variable from cold subhumid to very cold through the fresh humid to continental semi-arid.

### Sampling Sites

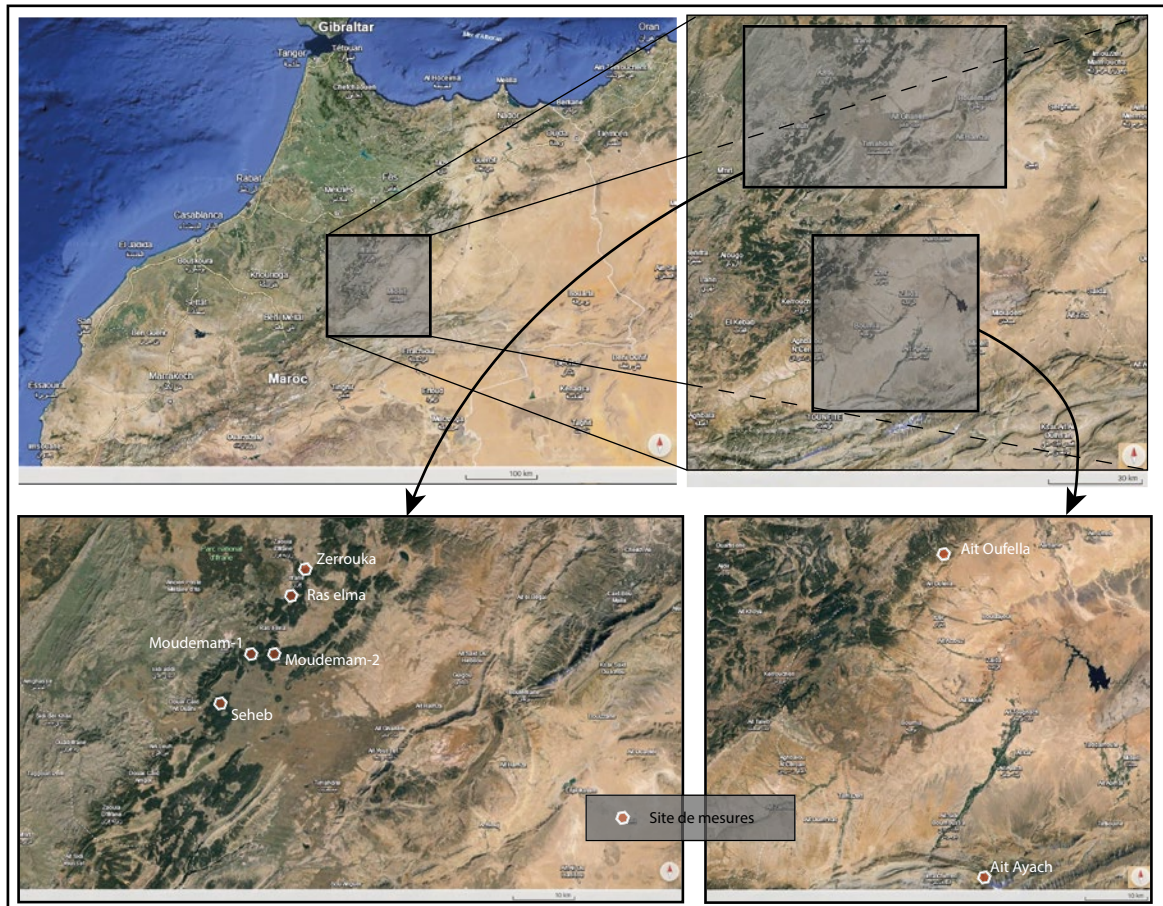
Male catkins were collected at the time of pollination from 2015 to 2019 in seven geographical populations of *C. atlantica*: Zerrouka, Ras elma, Moudemam-1, Moudemam-2, Seheb, Ait Oufella located in the central Middle Atlas, and Ait Ayach in the High Atlas (figure 1, tables I and II). The pure and dense populations of Moudemam-1, Seheb, and Moudemam-2 are formed on a basalt-calcareous substratum of post-Villafranchian Plio-Quaternary age (basalt and ancaratrite lavas) and characterised by a fresh and stable wet bioclimate. In the forests of Zerrouka and Ras elma, the populations are characterised by the presence of *C. atlantica* and *Quercus rotundifolia* Lam. on substratum rich in carbonate of Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup> of Liasic age, wealthy in fossils with the cold subhumid climate.

The Ait Oufella forest covers an area of 5,650 ha located on the southern edge of the Middle Atlas, about 40 km northwest of Midelt, on a calcareo-dolomitic Lias associated with the marl-limestone Cretaceous and a few pockets of red clay and Triassic basalts (Rhanem 2011). The general climate of this station is semi-arid, characterised by low rainfall and a marked drought for a long part of the year (Rhanem 2009). The population of Ait Ayach is less

than 7 km from the Cirque of Jaaffar and is characterised by the presence of *C. atlantica* and *Q. rotundifolia* Lam. on a calcareous substratum of Villafranchian and Quaternary alluviocolluvial with a semi-arid continental climate.

### Extraction, germination and dosage

Our pollen extraction technique consisted in a preliminary mixing of the catkins, then we kneaded them and passed them through a series of sieves arranged in descending order (0.2 mm; 0.125 mm; 0.1 mm; 0.04 mm). The extracted pollen was stored at 4 °C in airtight jars. For the in vitro germination experiments, 10 mg of *C. atlantica* pollen were sprinkled uniformly on a slide (2.5 × 7.5 cm) containing 2 ml of culture medium and then incubated in the dark at 29.5 °C for 3 days in a humid chamber to avoid drying out the slides. The medium contains 0.29 M sucrose, 2.5 10<sup>-5</sup> M boric acid (Ching and Ching 1976), 6 mg/L penconazol, 0.1 g/L chloramphenicol, 0.1 g/L streptomycin, and 0.5% agar. From the male catkins of the 10 trees at each station, 3 slides per individual were prepared. Starch was determined on 2 g of pollen from the mixture of 500 catkins (Braconnot 1829). Amylase activity was determined on 10 g of pollen after 72 hours of germination (Roychan and Chaudhari 2001).



**Figure 1.**

Locations of the natural areas of the sampled populations of *Cedrus atlantica* Manetti.

Photography is based on topographic data from Google earth version 7.3.6 (Data: SIO, NOAA, U.S. Navy, GNA, GEBCO; Image: Landsat/ Copernicus, IBCAO, U.S. Geological Survey).

**Table I.**

Sampled populations of *Cedrus atlantica* Manetti according to the location and site parameters.

Mountains	localities	Geographical coordinates	Elevation (m, amsl)	Bioclimate (Koppen-Geiger scale)	Parent rock
Mountains	Zerrouka	33°32'N-5°06' W	1637	Csb: Cold subhumid to very cold	Calcareous/dolomite/sander
	Ras elma	33°30'N-5°07'W	1659		
Middle Atlas	Moudemam-1	33°25'N-5°11'W	1786	Csa: Fresh humid	Basalt-Calcareous
	Moudemam-2	33°25'N-5°09'W	1780		
	Seheb	33°21'N-5°14' W	1800		
High Atlas	Ait Oufella	32°58'N-5°03'W	1982	Bsk: Semi-arid continental	Calcareous
	Ait Ayach	32°31'N-4°59'W	1972		

### Observations and calculation

On each slide, pollen grains of 20 microscopic fields of 2 mm diameter at × 100 magnification were photographed with an optical microscope (Optika DM-15, Italy) equipped with a camera, and the different measurements were made with a software (Opmias Ver1.0, 2001-2008). Six hundred fields of view corresponding to 300 mg of pollen were made for each station at a rate of 60 per individual. We calculated the total number of pollens in the 600 microscopic

**Table II.**

Temperatures (°C), precipitations (mm) and humidity (%) during the period of pollen production of the sampled populations of *Cedrus atlantica* Manetti (Regional Directorate of Meteorology North-East Region).

	Localities	May	June	July	August	September
Middle Atlas	Zerrouka, Ras elma	13.6 (77) (60)	18.3 (39) (52)	22.2 (25) (44)	22 (33) (43)	17.5 (50) (54)
	Moudemam-1, Moudemam-2, Seheb	13.7 (64) (59)	18.5 (30) (51)	22.4 (20) (43)	22.2 (24) (42)	17.7 (39) (53)
	Ait Oufella	16.5 (39) (42)	21.5 (20) (34)	25.5 (10) (27)	24.5 (15) (30)	19.4 (33) (43)
High Atlas	Ait Ayach	16.5 (39) (42)	21.5 (20) (34)	25.5 (10) (27)	24.5 (15) (30)	19.4 (33) (43)



**Photo 2.**

*Cedrus atlantica* Manetti branch density in the High Atlas Mountains of central-eastern Morocco. Photo M. Bendriss Amraoui.

**Table III.**

P value of multiple comparison Tukey test of five parameters of pollen of the seven populations of *Cedrus atlantica* studied.

	PTL	NGP	NPT	%	Starch	Amylase
Zerrouka - Ras elma	0.000*	0.000*	0.970	0.000*	1.000	1.000
Zerrouka - Moudemam-2	0.000*	0.000*	0.020*	0.000*	0.997	0.992
Zerrouka - Moudemam-1	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.855	0.526
Zerrouka - Seheb	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.014*	0.965
Zerrouka - Ait Oufella	0.236	0.000*	0.000*	0.000*	0.49	0.716
Zerrouka - Ait Ayach	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.524	0.888
Ras elma - Moudemam-2	0.903	0.991	0.228	0.752	0.998	0.967
Ras elma - Moudemam-1	0.000*	0.000*	0.000*	0.652	0.878	0.42
Ras elma - Seheb	0.000*	0.036*	0.000*	0.000*	0.017*	0.908
Ras elma - Ait Oufella	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.524	0.599
Ras elma - Ait Ayach	0.000*	0.000*	0.000*	0.997	0.566	0.793
Moudemam-2 - Moudemam-1	0.000*	0.000*	0.000*	0.029*	0.992	0.845
Moudemam-2 - Seheb	0.000*	0.003*	0.000*	0.000*	0.072	1.000
Moudemam-2 - Ait Oufella	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.831	0.960
Moudemam-2 - Ait Ayach	0.000*	0.000*	0.000*	0.356	0.908	0.998
Moudemam-1 - Seheb	0.000*	0.000*	0.535	0.006*	0.346	0.928
Moudemam-1 - Ait Oufella	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.995	1.000
Moudemam-1 - Ait Ayach	0.000*	0.000*	0.000*	0.945	1.000	0.983
Seheb - Ait Oufella	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.802	0.991
Seheb - Ait Ayach	0.035*	0.000*	0.000*	0.000*	0.151	1.000
Ait Oufella - Ait Ayach	0.000*	0.000*	1.000	0.000*	0.999	1.000

PTL: Pollen tube length's; NGP: Number of germinated pollen per microscopic field; NPT: number of pollen total per microscopic field; %: Germination frequency of pollen; \* Statistically significant at the level of 5%.

fields per station (Nt), the total number of pollens germinated in the 600 microscopic fields per station (Ng). The frequency of pollen germination was calculated as the pollen germinated number ratio to the total of the pollen grains (germinated pollen + un-germinated pollen) × 100. The density of germinated or total pollen per microscopic field in each station is calculated, respectively, according to the ratio Ng or Nt on the 600 microscopic fields. The mean ( $\pm 1 \mu\text{m}$ ) pollen tube length was determined from the pollen tubes of all germinated grains. A pollen grain was considered to have germinated when the pollen tube length was greater than or equal to the grain diameter. We determined descriptive statistics; for pollen tube length we calculated the mean, the maximum, the minimum, the standard error, and the coefficient of variation. For pollen starch reserve content (mg/g of pollen), the values were obtained by the standard range equation:  $y = 1.0336x - 0.0269$  with  $R^2 = 0.99743$ ; we only determined the mean and the standard error. The mean  $\pm$  the standard error for amylase activity was expressed as mg maltose/min/g pollen.

Using Excel 2007 software, we defined similar semi-quantitative classes of pollen tube length at an amplitude of 100  $\mu\text{m}$  for all stations, taking into account all pollen tube length values. In order to make the pollen tube length values continuous, we presented them as continuous classes to avoid a value being taken into account twice, the last value being 1,300  $\mu\text{m}$ . For each station, the size of each class of values is determined by the number of times each class is represented in the station. The frequency of each class was calculated by the ratio of the number of each class to the sum of the numbers of all classes.

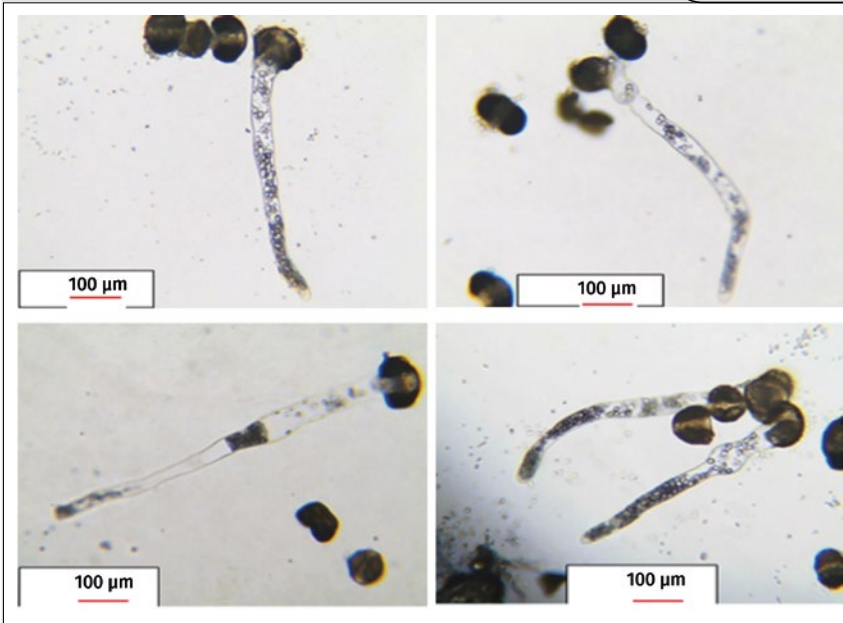
### Statistical analysis

Differences between the different geographical sites were calculated using the Tukey test at a significance level of 5% on the mean values of the pollen characteristics. Linear regression analyses were carried out between the pollen characteristics and the station parameters (station, temperature, precipitation and humidity). All data were statistically analysed with IBM SPSS Statistics 20.0 software.

**Table IV.**

Pollen production and germination in the stations. Density = average total or germinated number of pollen per microscope field; Nt: total number of pollen found in the 600 fields; Ng: total number of germinated pollen found in the 600 fields; germination frequency =  $\text{Ng}/\text{Nt} \times 100$ .

	Pollen	Zerrouka	Ras elma	Moudemam-1	Moudemam-2	Seheb	Ait Oufella	Ait Ayach
Density	Total	8.98 $\pm$ 0.332	8.32 $\pm$ 0.272	21.05 $\pm$ 0.771	6.64 $\pm$ 0.222	22.36 $\pm$ 0.761	16.97 $\pm$ 0.454	17.05 $\pm$ 0.444
	Germinated	1.31 $\pm$ 0.025	0.35 $\pm$ 0.021	0.60 $\pm$ 0.047	0.38 $\pm$ 0.024	0.22 $\pm$ 0.018	1.67 $\pm$ 0.044	0.81 $\pm$ 0.018
Germination	Nt	5,388	4,992	12,630	3,984	13,416	10,182	10,230
	Ng	787	213	359	232	133	1,003	487
	%	14.60	4.26	2.84	5.82	0.99	9.85	4.76



**Figure 2.**  
 Germinating *Cedrus atlantica* M. pollen (x 100).

## Results

The results obtained show that the number of total pollen as well as the number of germinated grains differ between the cedar stations. The averages of total pollen density per microscope field (NPT) significantly distinguish the seven populations according to location except between Zerrouka – Ras elma, Ras elma – Moudemam-2, Moudemam-1 – Seheb, and Ait Oufella – Ait Ayach (table III). The densities of germinated pollen (NGP) also differentiate all the populations from each other except those of Ras elma and Moudemam-2. In the same sense, the number of total pollen grains (Nt) varies enormously between the populations, with maximum values in Moudemam-1 and Seheb, intermediate values in Ait Oufella and Ait Ayach, and minimum values in Zerrouka, Ras elma, and Moudemam-2. In contrast, the frequency of pollen germination (%) decreased progressively from the Zerrouka population to those of Ait Oufella, Moudemam-2, Ait Ayach, Ras elma, Moudemam-1, and Seheb. This frequency is significantly different between all sites except between Ras elma and Moudemam-1, Moudemam-2 and Ait Ayach; and between Ait Ayach and Moudemam-1 and Moudemam-2 (tables III and IV).

The existing starch reserves in pollen before germination are significantly different between Seheb, Zerrouka, and Ras elma and similar for all other sites. The populations showed no significant difference in pollen amylase activity (tables III and V). The mean value of pollen tube length is variable from 258.14 to 531.33 µm in, respectively, the populations of Seheb and Moudemam-1, with a variable maximum of 611.76 µm in Seheb to 1,255.56 µm in Moudemam-1, giving the pollens from these populations a high fertilizing power in contrast to the other stations. These values dropped to 343.23 µm in the population of Moudemam-2, ranged from 166.34 to 291.05 µm in the populations of Ait Oufella and Ait Ayach, and ranged between 154.25 and 330.97 µm in the populations of Zerrouka and

Ras elma. These length values significantly distinguish the populations of all stations except those of Zerrouka and Ait Oufella and those of Ras elma and Moudemam-2. The values of the coefficients of variation show that there is a large dispersion of the order of 28.61 to 50.21% around the average length of the tubes of the populations (figure 2; tables III and V).

The pollen tube class that groups all lengths between 100 and 200 µm is the most represented with a percentage of 33.45%, followed by the class [200-300[ with 21.91%, then the class [300-400[ with 17%, and finally the class [0-100[ with 13.63%. The populations of the stations of Ait Oufella and Zerrouka and, to a lesser degree, Ait Ayach and Ras elma dominate by the classes of the shortest pollen tube [0-100[ to [300-400[ µm on the other stations. The classes [400-500[ and [500-600[ dominate at

**Table V.**

Statistical description of starch reserves (mg/g pollen), amylase activity (mg maltose/min/g pollen), and mean pollen tube length (µm) of *Cedrus Atlantica* pollen from different study stations (n = 133 to 1,003)

Statistics		Stations						
		Zerrouka	Ras elma	Moudemam-1	Moudemam-2	Seheb	Ait Oufella	Ait Ayach
Starch		1.19 ± 0.3	1.17 ± 0.3	2.35 ± 0.27	1.85 ± 0.1	5.81 ± 1.4	4.03 ± 0.09	3.4 ± 1.75
Amylase		4.08 ± 0	4.20 ± 0.1	3.75 ± 0.2	4.30 ± 0.8	3.91 ± 0.4	4.68 ± 0.2	4.58 ± 0.7
Length	Moy	154.25	330.97	531.33	343.23	258.14	166.34	291.05
	Min	38.18	108.77	47.87	79.39	29.82	32.14	67.91
	Max	484.54	568.99	1,255.56	578.83	611.76	435	607.07
	ES	2.74	7.13	11.37	6.44	10.79	2.63	3.94
	CV	49.93	31.47	40.55	28.61	48.23	50.21	29.91

ES: Standard error  
 CV: Coefficient of variation

Ras elma, Ait Ayach, Moudemam-1 and 2; the class [600-700[ is only present in Moudemam-1, Seheb, and Ait Ayach, while the highest classes [700-800[ to [1,200-1,300[ except [1,100-1,200[ exist only at Moudemam-1 (table VI).

In order to see if there are relationships between all pollen indices and climatic factors, we used a linear regression analysis. Our results detected a significant link between pollen tube length, pollen production, pollen germination percentage, and the site, precipitation, and humidity in September. However, for the starch variable, a significant link was only found with the site, and for the amylase activity, no significance was found with the explanatory parameters (table VII).

## Discussion

The study of the pollen produced by the seven populations shows that the male sexual phenotype and the male tendency of *C. atlantica* are parameters intrinsically linked to geographical location. A close link between the amount of pollen released by plants and temperature has long been established by several authors (Khanduri and Sharma 2002; Clot 2003; Matsumoto et al. 2003; Khanduri and Sharma 2009; Ejsmond et al. 2011; Ejsmond et al. 2015; Sharma and Bhongde 2016). According to Besancenot and Thibaudon (2012) and Zhang et al. (2013) a warmer climate has a high probability to anticipate flowering dates, to

lengthen the pollen season, and to increase pollen concentrations. Recently, Monnier et al. (2020) reported that higher temperatures, by affecting the physiology of the plant, lead to an increase in pollen production. Several other authors have reported that a warmer climate increases pollen production in most woody species, angiosperms and gymnosperms, especially in catkin trees (Gehrig and Clot 2021; Glick et al. 2021; Adams-Groom et al. 2022; Thibaudon and Besancenot 2022). In contrast, Ejsmond et al. (2011) found a reduction in pollen production at high temperatures compared to low temperatures. These observations suggest that pollen formation is species dependent. On the other hand, several authors have reported that when temperatures rise, most species produce pollen with a low surface/volume ratio, allowing them to resist desiccation pressure and evapotranspiration (Aylor 2003; Aylor et al. 2005; Cruden 2009; Nepi et al. 2010; Ejsmond 2015).

In the sites of Ait Oufella and Ait Ayach, where a hottest and least rainy summer in July-August not exceeding 15 mm; characteristic of an absolute aridity during the period of formation of the sexual organs of the cedar in summer; we find a weak release of pollen in these stations compared to Moudemam-1 and Seheb, where the temperature is lower with heavy monthly precipitation during the months of May to September. These facts show that the variation in pollen formation in *C. Atlantica* recorded between our populations here may be due essentially to variation in rainfall, as these stations differ slightly in temperature but greatly in rainfall. These findings are consistent with those on *C. deodara*

that show high pollen productivity when significant rainfall precedes flowering (Khanduri and Sharma 2009). On the other hand, the regression analysis has shown a relation between pollen production, rainfall, and humidity only in pollen phase maturation (September), suggesting that the climatic differences between our sites during June, July, and August from 2015 to 2019 were probably not sufficient to induce variation in pollen production and had little influence on this parameter. This observation shows that the variation in pollen production obtained in our study was due to the geographical situation effect, as found for Zerrouka, Ras elma and Moudemam-2. This trend implies a combined effect of many complex factors (genetic, physiological, and climatic) on the variation of the number of pollens released (Khanduri and Sharma 2009).

**Table VI.**

Numbers and frequencies of pollen tube length classes.

Classes (µm)	Stations								Total	Frequency%
	Zerrouka	Ras elma	Moudemam-1	Moudemam-2	Seheb	Ait Oufella	Ait Ayach			
[0-100[	203	0	2	2	12	214	5	438	13.63	
[100-200[	393	24	26	15	39	510	68	1075	33.45	
[200-300[	151	62	23	63	34	183	188	704	21.91	
[300-400[	32	76	53	89	32	85	179	546	17	
[400-500[	8	34	58	50	10	11	40	211	6.56	
[500-600[	0	17	60	13	5	0	6	101	3.14	
[600-700[	0	0	48	0	1	0	1	50	1.55	
[700-800[	0	0	47	0	0	0	0	47	1.46	
[800-900[	0	0	29	0	0	0	0	29	0.90	
[900-1000[	0	0	10	0	0	0	0	10	0.31	
[1000-1100[	0	0	2	0	0	0	0	2	0.06	
[1100-1200[	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
[1200-1300[	0	0	1	0	0	0	0	1	0.03	
<b>Total</b>	<b>787</b>	<b>213</b>	<b>359</b>	<b>232</b>	<b>133</b>	<b>1,003</b>	<b>487</b>	<b>3,214</b>	<b>100</b>	

However, it has been reported that the productivity, the interval of production, and the release of pollen strobili depend on year and population in *C. deodara* (Khanduri and Sharma 2009) and other species (Allison and Treseder 2008). Our results do not agree with the suggested environmental condition dependences on the pollen observed on many species (Ejsmond et al. 2011; Ejsmond et al. 2015; Griener and Warny 2015; Jardine and Lomax 2017), but revealed specific responses of *C. atlantica* to geographical location and are in line with the data of Smith (1923) who noted “irregularity” with the development of pollen, and Bell et al. (2017, 2018a) who found no significant relationships between climate, soil nutrient availability, and pollen size for Atlas cedar.

In the stations of Ras elma, Zerrouka, and Moudemam-2, which have low pollen production, the germination rate is very variable, whereas in those of Moudemam-1 and Seheb, where the production was relatively high, the pollen germination was low, suggesting a great variation in the size and water state of pollen. Furthermore, the reduction in pollen fertility recorded in the fresh humid locations, particularly in the Seheb population, was linked to the high sensitivity of pollen to the level of humidity in this site, as showed by the regression analysis (table VII) and as reported by several authors for well-hydrated sites (Aylor 2003; Aylor et al. 2005; Nepi et al. 2010). This observation contrasts with the results of Ejsmond et al. (2011), who obtained a low germination rate when pollen was produced under water deficit conditions. This remark may be explained by the relatively high starch content in the pollen of Seheb and its deficiency in starch catabolism caused by the low digestibility and water absorption of starch due to its dense composition, as reported by MacNeill et al. (2017). Despite the low carbohydrate reserves of the pollen from the cold subhumid site compared to the fresh humid site, the pollen used exogenous sucrose supplied at 0.29 M in the medium to germinate more than the pollen from the fresh humid site populations. This observation was confirmed by relatively similar amylase activity in all populations and indicated that pollen sucrose consumption is probably involved in the inhibition of germination in the fresh humid site, as reported by Takaso and Owens (1995a) who have found that sucrose supplementation improved germination in *C. deodara*.

The elongation of the pollen tube is very heterogeneous between our populations but remains opposite to the germination rate. For example, in the population Moudemam-1 site where germination is low, the value of the length of the pollen tube is high from 600 to 1,300 µm, and vice versa for the populations of Zerrouka and Ait Oufella, which dominate by the classes of the shortest pollen tube from [0-100[ to [100-200[ in the populations of Ras elma, Moudemam-2, and Ait Ayach, whose values of the germination and the elongation of the pollen were intermediate with, respectively, 4.26 to 5.82% and 100 to 700 µm.

**Table VII.**

Model summary of the regression analysis.

Model	Unstandardized coefficients		Standardized coefficients	t	Significance	R	
	A	Standard error					Bêta
PTL	(Constant)	-1,992.538	85.428		-23.324	0.000*	0.617
	Station	78.156	4.403	1.089	17.751	0.000*	
	P September	-6.081	1.200	-0.274	-5.066	0.000*	
	H September	4,432.140	100.574	1.438	44.069	0.000*	
NGP	(Constant)	11.224	0.381		29.426	0.000*	0.466
	Station	-0.358	0.019	-0.791	-18.948	0.000*	
	P September	-0.028	0.005	-0.202	-5.502	0.000*	
	H September	-15.666	0.474	-0.817	-33.070	0.000*	
NPT	(Constant)	-72.781	6.131		-11.871	0.000*	0.362
	Station	5.143	0.304	0.745	16.945	0.000*	
	P September	0.343	0.081	0.163	4.217	0.000*	
	H September	104.710	7.615	0.358	13.751	0.000*	
%	(Constant)	162.606	9.727		16.716	0.000*	0.319
	Station	-7.219	0.482	-0.670	-14.991	0.000*	
	P September	-0.356	0.129	-0.108	-2.755	0.006*	
	H September	-212.269	12.081	-0.465	-17.570	0.000*	
Starch	(Constant)	87.610	227.086		0.386	0.703	0.633
	Station	1.302	0.601	1.063	2.166	0.039*	
	T May	-3.874	7.856	-2.200	-0.493	0.626	
	P September	0.058	0.180	0.142	0.320	0.752	
	H September	-71.652	227.264	-1.490	-0.315	0.755	
Amylase	(Constant)	3.056	3.390		0.901	0.389	0.607
	Station	0.01	0.168	0.045	0.059	0.954	
	P September	0.054	0.045	0.804	1.192	0.261	
	H September	-2.072	4.210	-0.224	-0.492	0.633	

PTL: Pollen tube length's; NGP: Number of germinated pollens per microscopic field; NPT: number of pollens total per microscopic field; %: Germination frequency of pollen; P: Precipitations; H: Humidity; \* Statistically significant at the level of 5%.

These variations show that the growth of the pollen tube, which was found to be linked to site, rainfall, and humidity, was also conditioned by the pollen germination rate, whatever the station, suggesting the existence of a compromise between these two processes for resources. This trade-off, in parallel with the effects of site, rainfall, and humidity recorded above on production and germination, translates into overall differences in the ecological requirements of reproduction between our populations. Moreover, this pollen resource-dependent growth has also been reported in several studies (Cruzan 1990; Cruden 2009; Johri and Vasil 1961; Ejsmond et al. 2015; Vasil 1974; Baker 1983; Cruden and Lyon 1985; Lau and Stephenson 1994). Indeed, an increase in pollen reserves was found to be necessary to obtain a large pollen tube (Ejsmond et al. 2011). Similarly, Cruzan (1990) on *Erythronium grandiflorum* and Takaso and Owens (1995b) on *C. deodara* found that pollen resources are sufficient for self-growth in the ovary and that sucrose supplementation improves germination by 11% and pollen tube by 85  $\mu\text{m}$ . These data show the existence of competition between germination and elongation for pollen reserves and suggest that the differences between our populations were due to variations in germination and elongation process in terms of priority of pollen resource use. These findings agree with the study of Astija and Musdalifah (2018), who found a regulation of pollen germination and tube elongation in tomato by cell wall invertase through sucrose hydrolysis in medium containing sucrose only, but not in glucose and fructose. This recalled the control of pollen tube tip growth by a Rop GTPase-dependent pathway that leads to tip-localised calcium influx (Roger and Li 1999) and suggested studies on the effect of medium composition on germination and tube elongation of *C. atlantica* pollen.

In the case of *C. atlantica*, as the period of sexual organ production (Khanfouci 2005) coincides in summer with an increase in temperature,  $\text{CO}_2$  and radiation (June to August), the pollen benefits from a significant flux of carbon (Aussenac and Finkelstein 1983; Ziska et al. 2003; Wayne et al. 2002; Stinson et al. 2006; Zhang et al. 2013) due to the increase in solar intensity and temperature. Despite this, the summer temperature rise does not increase the pollen tube, starch supply, or pollen amylase activity in populations of the cold subhumid and semi-arid localities where the heat rises more in the summer compared to the fresh humid sites. On the other hand, it reduced the pollen tube of the Ait Oufella population of the semi-arid site and the Zerrouka population of the cold subhumid site, as well as the starch stock of the pollen of the latter population. These observations show that pollen tube elongation in *C. atlantica* is not dependent on endogenous pollen starch resources but is still sensitive to site and, to a lesser extent, to precipitation and humidity in the month of September, as revealed by the regression analysis. This contrasts with studies in which water deficit conditions induce a low germination rate but yield long pollen tubes depending on pollen volume (Cruden 2009; Ejsmond et al. 2011; Aylor 2003; Aylor et al. 2005; Nepi et al. 2010) and in which desiccation pressure caused by high temperatures increases pollen reserves (Ejsmond et al. 2015).

The existence of great variability in the sensitivity of germination and pollen tube growth to intense solar radiation which can produce effects in interaction with  $\text{CO}_2$  and temperature on pollen, has been shown by several studies (Feng et al. 2000; Koti et al. 2005; Llorens et al. 2015; Zhang et al. 2014). Similarly, other authors have shown that a mutation in chalcone synthase, a key enzyme in the synthesis of UV-B absorbing phenolic compounds, which can manifest itself with an alteration of the cell membrane by strong irradiation, decreases the viability and length of the pollen tube and blocks pollen germination in *Petunia* and *Cucumis melo* L. (Taylor and Jorgensen 1992; Cuny and Roudot 1991). This effect was found to depend on the radiation dose and pollen size. In contrast, radio resistance was found to be inversely proportional to pollen size in apple, pear and melon (Cuny and Roudot 1991; Jinks et al. 1981). Furthermore, it has been shown by Bell et al. (2018b) that at the geographical localities of the Middle Atlas where our populations are located and from which our pollens were collected, a longitudinal East-West gradient of UV-B flux occurs during the months of July and August, which returns to the expected North-South latitudinal gradient in September. According to this study by Bell et al. (2018b), a wave of radiation has been affecting our populations of Moudemam-1, Moudemam-2, and Seheb sites in the Azrou region from June to September, whereas those of Zerrouka and Ras elma sites in the Ifrane region are only slightly affected in July and August, and those of Ait Oufella and Ait Ayach sites in the Itzer and Tounfite regions are affected in September, after pollen development. The low germination rate found here in our populations of fresh and humid sites is consistent with the long 4-month exposure of this region to high UV-B radiation, which, by inducing enzyme mutation or cell membrane alteration, may block carbon catabolism, as found here in the pollen of Seheb. This slowing of germination in these populations by radiation could be the cause of the development of a long pollen tube by the germinating pollen. On the other hand, the high germination rates noted in the populations of the cold subhumid site Zerrouka and the semi-arid site Ait Oufella agree with the short duration of exposure to UV-B radiation in these two sites. This instability in cedar pollen viability observed here corroborates the variability in pollen grain size observed by Bell et al. (2018b) in *C. atlantica*. These authors found that populations of *C. atlantica* M. exposed to UV-B in the summer to protect the viability of their pollen significantly accumulate UV-B absorbing phenolic compounds such as p-coumaric acid and ferulic acid. The possible cause of this instability is the development of a certain summer radio resistance inversely proportional to pollen size, as has been developed by several species (Cuny and Roudot 1991; Jinks et al. 1981). This radio resistance would be triggered in *C. atlantica* pollen by the accumulation of p-coumaric acid and ferulic acid in the sporopollenin, responsible for the decline of resources and subsequently the reduction of germination and the increase of the pollen tube, as observed here in the Moudemam-1 station. These factors likely allow us to find links between pollen traits and climate only in September.





**Photo 3.**  
*Cedrus atlantica* Manetti male cone in the High Atlas Mountains of central-eastern Morocco.  
Photo M. Bendriss Amraoui.



**Photo 4.**  
*Cedrus atlantica* Manetti seedling in the High Atlas Mountains of central-eastern Morocco.  
Photo M. Bendriss Amraoui.

## Conclusion

In this study on *Cedrus atlantica* in the High Atlas Mountains of central-eastern Morocco, there is significant ecological variation in pollen production, germination, and elongation among geographical localities. Our results suggest an extrinsic control of *C. atlantica* characteristic reproduction by site, precipitation, and humidity in September. However, these data on the effect of location on pollen remain fragmentary and call for further studies to better elucidate the effect of climate in interaction with radiation, pollen size, and carbon reserves on the pollen viability and tube length of *C. atlantica* for an efficient conservation of the genetic heritage of Moroccan cedars.

### Funding

This work was funded by Biology Department, Faculty of Science Dhar El Mahraz, Sidi Mohamed Ben Abdellah University, Fes, Morocco.

### Access to data

The data used to produce this study can be accessed with an agreement of the corresponding author.

## References

- Achhal A., Akabli O., Barbero M., Benabid A., M'hirit O., et al., 1980. About the bioclimatic and dynamic value of some forest tree species in Morocco. *Ecologia Mediterranea*, 5: 211-249. [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=About%20the%20bioclimatic%20and%20dynamic%20value%20of%20some%20forest%20tree%20species%20in%20Morocco&author=A.%20Achhal&author=O.%20Akabli&author=M.%20Barbero&publication\\_year=1980](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=About%20the%20bioclimatic%20and%20dynamic%20value%20of%20some%20forest%20tree%20species%20in%20Morocco&author=A.%20Achhal&author=O.%20Akabli&author=M.%20Barbero&publication_year=1980)
- Adams-Groom B., Selby K., Derrett S., Frisk C. A., Pashley C. H., Satchwell J., et al., 2022. Pollen season trends as markers of climate change impact: *Betula*, *Quercus* and *Poaceae*. *Science of the Total Environment*, vol. 831: 154882. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154882>
- Allison S. D., Treseder K. K., 2008. Warming and drying suppress microbial activity and carbon cycling in boreal forest soils. *Global Change Biology*, 14 (12): 2898-2909. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01716.x>
- Astija A., Musdalifah, 2018. Effect of Watering on Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Plant Growth. *International Journal of Science and Research*, 7 (2): 194-196. <https://doi.org/10.21275/ART20179933>
- Aussenac G., Finkelstein D., 1983. Influence de la sécheresse sur la croissance et la photosynthèse du cèdre. *Annales de la Science Forestière*, 40 (1) : 67-77. <https://doi.org/10.1051/forest:19830103>
- Aylor D. E., 2003. Rate of dehydration of corn (*Zea mays* L.) Pollen in the air. *Journal of Experimental Botany*, 54 (391): 2307-2312. <https://www.jstor.org/stable/23697938>
- Aylor D. E., Baltazar B. M., Schoper J. G., 2005. Some physical properties of teosinte (*Zea mays* subsp. *parviglumis*) pollen. *Journal of Experimental Botany*, 56: 2401-2407. <https://doi.org/10.1093/jxb/eri232>
- Baker H. G., Baker I., 1983. Some evolutionary and taxonomic implications of variation in the chemical reserves of pollen. In: *Pollen: Biology and Implications for Plant Breeding*. Mulcahy D. L., Ottaviano E. (eds), Elsevier Science Ltd, 43-51.
- Bariteau M., Panetsos K. P., M'hirit O., Scaltsoyiannes A., 1999. Variabilité génétique du cèdre de l'atlas en comparaison avec les autres cèdres méditerranéens. *Forêt Méditerranéenne*, 20 (4) : 175-190. <https://www.foret-mediterraneenne.org/fr/catalogue/id-712-variabilite-genetique-du-cedre-de-l-atlas-en-comparaison-avec-les-autres-cedres-mediterraneens->
- Belhassan K., Hessane M. A., Essahlaoui A., 2010. Interactions eaux de surface – eaux souterraines : bassin versant de l'Oued Mikkes (Maroc). *Journal des Sciences Hydrologiques*, 55 (8) : 1371-1384. <https://doi.org/10.1080/02626667.2010.528763>
- Bell B. A., Bishop T. H., Fletcher W. J., Ryan P., Ilmen R., 2018a. *Cedrus atlantica* pollen morphology and investigation of grain size variability using laser diffraction granulometry. *Palynology*, 42 (3): 339-353. <https://doi.org/10.1080/0191612.2.2017.1356760>
- Bell B. A., Fletcher W. J., Peter R., Seddon W. R. A., Wogelius A. R., Ilmen R., 2018b. UV-B-absorbing compounds in modern *Cedrus atlantica* pollen: The potential for a summer UV-B proxy for Northwest Africa. *The Holocene*, 28 (9): 1382-1394. <https://doi.org/10.1177/0959683618777072>
- Bell B. A., Fletcher W. J., Ryan P., Grant H., Ilmen R., 2017. Stable carbon isotope analysis of *Cedrus atlantica* pollen as an indicator of moisture availability. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 244: 128-139. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2017.04.008>
- Besancenot J. P., Thibaudon M., 2012. Changement climatique et pollinisation. *Revue des Maladies Respiratoires*, 29 (10) : 1238-1253. <https://doi.org/10.1016/j.rmr.2012.07.007>
- Bouahmed A., Vessella F., Schirone B., Krouchi F., Derridj A., 2019. Modeling *Cedrus atlantica* potential distribution in North Africa across time: new putative glacial refugia and future range shifts under climate change. *Regional Environmental Change*, 19 : 1667-1682. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01503-w>
- Braconnot M. H., 1829. Recherches chimiques sur le pollen du *Typha latifolia*, Lin, famille des typhacées. *Annales de chimie et de physique*, 42 (16).
- Chaponniere A., Smakhtin V., 2006. A review of climate change scenarios and preliminary rainfall trend analysis in the Oum Er Rbia Basin, Morocco. *International Water Management Institute*, 110 (8). <https://doi.org/https://doi.org/10.3910/2009.291>
- Ching T. M., Ching K. K., 1976. Rapid viability tests and aging study of some coniferous pollen. *Canadian Journal of Forest Research*, 6: 516-522. <https://doi.org/10.1139/x76-071>
- Chowdhury R. C., 1961. The morphology and embryology of *Cedrus deodara* Loud. *Phytomorphology*, 11: 283-304.

- Clot B., 2003. Trends in airborne pollen: An overview of 21 years data in Neuchâtel (Switzerland). *Aerobiologia*, 19: 227-234. <https://doi.org/10.1023/B:AERO.0000006572.53105.17>
- Cruden R. W., 2009. Pollen grain size, stigma depth, and style length: the relationship revisited. *Plant Systematics and Evolution*, 278 (3): 223-238. <https://doi.org/10.1007/s00606-008-0142-8>
- Cruden R. W., Lyon D. L., 1985. Correlations among stigma depth, style length, and pollen grain size: Do they reflect function or phylogeny? *Botanical Gazette*, 146: 143-149. <https://www.jstor.org/stable/2474487>
- Cruzan M. B., 1990. Variation in pollen size, fertilization ability, and postfertilization siring ability in *Erythronium grandiflorum*. *Evolution*, 44 (4): 843-856. <https://doi.org/10.2307/2409550>
- Cuny F., Roudot A. C., 1991. Germination et croissance pollinique in vitro du pollen de melon (*Cucumis melo* L) après irradiations Gamma. *Environmental and Experimental Botany*, 31 : 277-283. [https://doi.org/10.1016/0098-8472\(91\)90051-0](https://doi.org/10.1016/0098-8472(91)90051-0)
- Dardelle F., 2011. Étude des mécanismes d'adhésion des tubes polliniques d'*Arabidopsis thaliana* par une approche de génétique chimique. Thèse de doctorat, Université de Rouen Normandie, 171 p. <https://normandie-univ.hal.science/tel-01978274>
- Delph L. F., Weinig C., Sullivan K., 1998. Why fast-growing pollen tubes give rise to vigorous progeny: the test of a new mechanism. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 265: 935-939. <https://doi.org/10.1098/rspb.1998.0381>
- Derridj A., Cadeac F., Durrieu G., 1991. Étude de la variabilité géographique des dimensions des pollens du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) en Algérie. *Bulletin de la Société Botanique de France, Lettres Botaniques*, 138 (3) : 215-230. <https://doi.org/10.1080/01811797.1991.10824923>
- Donadieu P., 1977. Contribution à une synthèse bioclimatique et phytogéographique au Maroc. Institut Agronomique et Vétérinaire, Hassan II, Maroc, 155 p.
- Ejsmond M. J., Ejsmond A., Banasiak Ł., Ska-Kotaczek M. K., Kozłowski J., Kotaczek P., 2015. Large pollen at high temperature: an adaptation to increased competition on the stigma? *Plant Ecology*, 216: 1407-1417. <https://doi.org/10.1007/s11258-015-0519-z>
- Ejsmond M. J., Pilarek D. W. S., Ejsmond A., Dragosz-kluska D., Ska-kotaczek M. K., Kotaczek K., et al., 2011. Does climate affect pollen morphology? Optimal size and shape of pollen grains under various desiccation intensity. *Ecosphere*, 2 (10). <https://doi.org/10.1890/ES11-001471>
- El Bakkali N., Bendriss Amraoui M., 2022. Structure of Needle Highlights Ecological Adaptability and Microevolution of Natural Populations of *Cedrus atlantica* in Morocco. *International Journal of Forestry Research*, ID 5415807. <https://doi.org/10.1155/2022/5415807>
- El Jihad M. D., 2016. Changement climatique et développement rural dans les montagnes du Moyen-Atlas et leurs bordures (Maroc). *Journal of Alpine Research*, 104 (4): 19 p. <https://doi.org/10.4000/rga.3373>
- Emberger L., 1939. Aperçu général sur la végétation du Maroc. *Veröff. Geobot. Inst. ETH Stiftung Rübel Zürich*, 14 : 40-157. <https://www.worldcat.org/fr/title/aperçu-general-sur-la-vegetation-du-maroc-commentaire-de-la-carte-phytogeographique-du-maroc-1-1-500-000/oclc/803832543>
- Fayant P., 2010. Modélisation par éléments finis de la croissance du tube pollinique. Mémoire de Master 2, Département de Génie Mécanique, École Polytechnique de Montréal. <https://publications.polymtl.ca/333/>
- Feng H., An L., Tan L., Hou Z., Wang X., 2000. Effect of enhanced ultraviolet-B radiation on pollen germination and tube growth of 19 taxa in vitro. *Environmental and Experimental Botany*, 43: 45-53. [https://doi.org/10.1016/S0098-8472\(99\)00042-8](https://doi.org/10.1016/S0098-8472(99)00042-8)
- Forest F., Moat J., Baloch E., Brummitt N. A., Bachman S. P., Ickert-Bond S., et al., 2018. Gymnosperms on the EDGE. *Scientific Reports*, 8 (1): 6053. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24365-4>
- Gehrig R., Clot B., 2021. 50 Years of Pollen Monitoring in Basel (Switzerland) Demonstrate the Influence of Climate Change on Airborne Pollen. *Frontiers in Allergy*, 2: 677159. <https://doi.org/10.3389/falgy.2021.677159>
- Glick S., Gehrig R., Eeftens M., 2021. Multi-decade changes in pollen season onset, duration, and intensity: A concern for public health? *Science of the Total Environment*, vol. 781: 146382. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146382>
- Gore P. L., Potts B. M., Volker P. W., Megalos J., 1990. Unilateral cross incompatibility in *Eucalyptus*: the case of hybridisation between *E. globulus* and *E. nitens*. *Australian Journal of Botany*, 38 (4): 383-394. <https://doi.org/10.1071/BT9900383>
- Griener K. W., Warny S., 2015. *Nothofagus* pollen grain size as a proxy for long-term climate change: An applied study on Eocene, Oligocene, and Miocene sediments from Antarctica. *Review of Paleobotany and Palynology*, 221: 138-143. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2015.06.003>
- Jardine P. E., Lomax B. H., 2017. Is pollen size a robust proxy for moisture availability? *Review of Palaeobotany and Palynology*, 246: 161-166. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2017.06.013>
- Jinks J. L., Caligari P. D. S., Ingram N. R., 1981. Gene transfer in *Nicotiana rustica* using irradiated pollen. *Nature*, 291: 586-588. <https://doi.org/10.1038/hdy.1985.114>
- Johri R. M., Vasil L. K., 1961. Physiology of pollen. *Botanical Review*, 27 (3): 325-381. <https://www.jstor.org/stable/4353637>
- Khanduri V. P., Sharma C. M., 2009. Cyclic pollen production in *Cedrus deodara*. *Sexual Plant Reproduction*, 22 (2): 53-61. <https://doi.org/10.1007/s00497-008-0091-y>
- Khanduri V. P., Sharma C. M., 2002. Pollen production, microsporangium dehiscence and pollen flow in Himalayan cedar (*Cedrus deodara* Roxb. ex d. Don). *Annals of Botany*, 89 (5): 587-593. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4233903/>
- Khanduri V. P., Sharma C. M., 2010. Male and female reproductive phenology and annual production of male cones in two natural populations of *Cedrus deodara*. *Nordic Journal of Botany*, 28 (1): 119-127. <https://doi.org/10.1111/j.1756-1051.2009.00335.x>

- Khanduri V. P., Sukumaran A., Sharma C. M., 2021. Gender plasticity uncovers multiple sexual morphs in natural populations of *Cedrus deodara* (Roxb.) G. Don. *Ecological Processes*, 10 (35): 11 p. <https://doi.org/10.1186/s13717-021-00311-7>
- Khanfouci M. S., 2005. Contribution à l'étude de la fructification et de la régénération du cèdre de l'Atlas. Mémoire de Master, Université de Batna, Algérie. [https://www.memoireonline.com/07/08/1372/m\\_memoire-etude-fructification-regeneration-cedre-atlas0.html](https://www.memoireonline.com/07/08/1372/m_memoire-etude-fructification-regeneration-cedre-atlas0.html)
- Kirk W. D. J., 1993. Interspecific size and number variation in pollen grains and seeds. *Biological Journal of the Linnean Society*, 49: 239-248. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8312.1993.tb00903.x>
- Konar R. N., Oberoi Y. P., 1969. Recent Work on Reproductive Structures of Living Conifers and Taxads. New York Botanical Garden Press, *Botanical Review*, 35 (2): 89-116. <https://doi.org/10.1007/BF02858911>
- Koti S., Reddy K. R., Reddy V. R., Kakani V. G., Zhao D., 2005. Interactive effects of carbon dioxide, temperature, and ultraviolet-B radiation on soybean (*Glycine max* L.) flower and pollen morphology, pollen production, germination, and tube lengths. *Journal of Experimental Botany*, 56 (412): 725-736. <https://doi.org/10.1093/jxb/eri044>
- Krouchi F., 2010. Étude de la diversité de l'organisation reproductive et de la structure génétique du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) en peuplement naturel (Tala guilef-Djurdjura nord-ouest, Algérie). Thèse doctorat, l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie.
- Labhar M., Tanghe M., 1998. Forest and Pre-Forest Environments of the Central and Western North Central Atlas: Geographical Approach, Phytoecology and Dynamics. University Sidi Mohammed Ben Abdellah, Fez, Morocco. <https://www.semanticscholar.org/paper/Les-milieux-forestiers-et-pr%C3%A9-forestiers-du-moyen-%3A-Labhar-Tanghe/b7d211d7c045bb94915b1204bbc850ae6fb6740f>
- Lanier L., 1994. Les champignons des cédraies en Algérie (étude comparative) : Le cèdre de l'Atlas *Cedrus atlantica* (Manetti). Maroc, FAO, CIHEAM, IUFR0, 27 : 554-561. <https://www.fao.org/3/AH002F/AH002F00.pdf>
- Lau T. C., Stephenson A. G., 1994. Effects of soil phosphorus on pollen production, pollen size, pollen phosphorus content and the ability to sire seeds in *Cucurbita pepo* (Cucurbitaceae). *Sexual Plant Reproduction*, 7: 215-220. <https://doi.org/10.1007/BF00232740>
- Lecompte M., 1969. La végétation du Moyen Atlas central : esquisse phyto-écologique et carte des séries de végétation au 1/200 000 Travaux de l'Institut Scientifique, Université Mohammed V. Série Botanique, Rabat, 31 (16) : 47 p. <http://www.abhatoo.net.ma/maalama-archives/archives-textuelles1/sciences-et-technologies/sciences-exactes-et-naturelles/sciences-biologiques/phytologie-botanique/la-vegetation-du-moyen-atlas-central-esquisse-phyto-ecologique-et-carte-des-series-de-vegetation-au-1-200-000>
- Llorens T. M., Yoseph S., Goll J., Hoffman J., Costa M. V., Borrego C. M., et al., 2015. Connecting biodiversity and potential functional role in modern euxinic environments by microbial metagenomics. *ISME Journal*, 9 (7): 1648-1661. <https://doi.org/10.1038/ismej.2014.254>
- Lord E. M., Eckard K. J., 1984. Incompatibility between the dimorphic flowers of *Collomia grandiflora*, a Cleistogamous Species. *Science*, 223: 695-696. <https://doi.org/10.1126/science.223.4637.695>
- MacNeill G. J., Mehrpouyan S., Minow M. A. A., Patterson J. A., Tetlow I. J., Emes M. J., 2017. Starch as a source, starch as a sink: the bifunctional role of starch in carbon allocation. *Journal of Experimental Botany*, 68 (16): 4433-4453. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx291>
- Maire R., 1924. Études sur la végétation et la flore du Grand Atlas marocain. Mémoire de la Société des Sciences Naturelles du Maroc, 4 (1). <https://bibdigital.rjb.csic.es/idurl/1/13150>
- Manicacci D., Barrett S. C. H., 1995. Stamen elongation, pollen size, and siring ability in *Tristylous Eichhornia paniculata* (Pontederiaceae). *American Journal of Botany*, 82 (11): 1381-1389. <https://doi.org/10.2307/2445864>
- Matsumoto M., Weickert C., Beltaifa S., Kolachana B., Chen J., Hyde T. M., Herman M. M., et al., 2003. Catechol O-Methyltransferase (COMT) mRNA Expression in the Dorsolateral Prefrontal Cortex of Patients with *Schizophrenia*. *Neuropsychopharmacol*, 28: 1521-1530. <https://doi.org/10.1038/sj.npp.1300218>. Epub 2003 Jun 11
- Monnier S., Thibaudon M., Besancenot J. P., Sindt C., Oliver G., 2020. Pollens et changement climatique. *Revue Française d'Allergologie*, 60 (4) : 246. <https://doi.org/10.1016/j.reval.2021.03.045>
- Nepi M., Cresti L., Guarnieri M., Pacini E., 2010. Effect of relative humidity on water content, viability and carbohydrate profile of *Petunia hybrida* and *Cucurbita pepo* pollen. *Plant Systematic and Evolution*, 284: 57-64. <https://doi.org/10.1007/s00606-009-0237-x>
- Pujos A., 1966. Les milieux de la cédraie marocaine. *Annales de la Recherche forestière au Maroc*, 8: 1-283.
- Quezel P., Medail F., 2003. Que faut-il entendre par « forêts méditerranéennes » ? Forêt Méditerranéenne, 24 (1) : 11-31. <https://www.foret-mediterraneenne.org/fr/catalogue/id-825-que-faut-il-entendre-par-forets-mediterraneennes->
- Rhanem M., 2009. L'alfa (*Stipa tenacissima* L.) dans la plaine de Midelt (haut bassin versant de la Moulouya, Maroc) – éléments de climatologie. *Géographie Physique et Environnement*, 3 : 1-20. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.696>
- Rhanem M., 2010. Esquisse d'une typologie géomorphologique de quelques cédraies à *Cedrus atlantica* Man. dans le Haut Atlas oriental de Midelt (Maroc). Menaces et perspectives de conservation, de gestion et de restauration. *Quaderni di Botanica ambientale e applicata*, 21: 135-153. [http://acrinwafrika.mnhn.fr/SiteAcrid/pdf\\_biblio/Rhanem\\_M\\_2010.pdf](http://acrinwafrika.mnhn.fr/SiteAcrid/pdf_biblio/Rhanem_M_2010.pdf)
- Rhanem M., 2011. Aridification du climat régional et remontée de la limite inférieure du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) aux confins de la plaine de Midelt (Maroc). *Physio-Géo Géographie physique et environnement*, 5 : 143-165. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.1983>
- Ripert C., Boisseau B., 1994. Écologie et croissance du cèdre de l'Atlas en Provence. in Le cèdre de l'atlas *Cedrus atlantica* (Manetti). M'Hirit O., Samih A., Malagnou M. (Eds). CEMAGREF, 107 p. <https://hal.inrae.fr/hal-02607801>

Roger A. C., Li Z. Y., 1999. Gamma-Ray Burst Environments and Progenitors. *The Astrophysical Journal*, 520: 29-32. <https://doi.org/10.1086/312147>

Roulston T. H., Cane J. H., Buchmann S. L., 2000. What governs protein content of pollen: pollinator preferences, pollen pistil interactions, or phylogeny? *Ecological Monographs*, 70: 617-643. [https://doi.org/10.1890/0012-9615\(2000\)070\[0617:WGPCOP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9615(2000)070[0617:WGPCOP]2.0.CO;2)

Roychan K. J., Chaudhari A., 2001. Purification and some properties of  $\alpha$  - amylase from indian Major Carp *Catla catla*. *Asian Fisheries Sciences*, 14: 269-277. <https://doi.org/10.33997/j.afs.2001.14.3.003>

Schaad D. A., Iriarte E., López-Sáez J. A., Pérez-Díaz S., Sabariego Ruiz S., et al., 2018. Are *Cedrus atlantica* forests in the Rif Mountains of Morocco heading towards local extinction? *The Holocene*, 28 (6): 1023-1037. <https://doi.org/10.1177/0959683617752842>

Sharma R., Bhondge S. W., 2016. Unpredictable Reproductive Behavior of *Cedrus deodara* (Roxb.) G. Don. *Journal of Forest and Environmental Science*, 32 (2): 113-119. <https://doi.org/10.7747/JFES.2016.32.2.113>

Smith R. W., 1923. Life History of *Cedrus atlantica*. *Botanical Gazette*, 75 (2): 203-208. <https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/333157>

Stinson K. A., Campbell S. A., Powell J. R., Wolfe B. E., Callaway R. M., et al., 2006. Invasive Plant Suppresses the Growth of Native Tree Seedlings by Disrupting Belowground Mutualisms. *PLoS Biology*, 4 (5): e140. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0040140>

Takaso T., Owens J. N., 1995a. Pollination drop and microdrop Secretions in *Cedrus*. *International Journal of Plant Science*, 156 (5): 640-649. <https://www.jstor.org/stable/2475043>

Takaso T., Owens J. N., 1995b. Ovulate Cone Morphology and Pollination in *Pseudotsuga* and *Cedrus*. *International Journal of Plant Science*, 156 (5): 630-639. <https://www.jstor.org/stable/2475042>

Taylor L. P., Jorgensen R., 1992. Conditional Male Fertility in Chalcone Synthase-Deficient *Petunia*. *Journal of Heredity*, 83: 11-17. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.jhered.a111149>

Thibaudon M., Besancenot J. P., 2022. Réchauffement climatique et pollen. *Revue Française d'Allergologie*, 62 (3) : 221-223. <https://doi.org/10.1016/j.reval.2020.02.052>

Thomas P., 2013. *Cedrus atlantica*. The IUCN Red List of Threatened Species. <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2013-1.RLTS.T42303A2970716.en>

US Geological Survey, 2017. GMTED2010. <https://lta.cr.usgs.gov/GMTED2010>

Van Breukelen E. W. M., 1982. Competition between 2x and x pollen in styles of *Solanum tuberosum* determined by a quick in vivo method. *Euphytica*, 31 (3): 585-590. <https://doi.org/10.1007/BF00039196>

Vasil I. K., 1974. The histology and physiology of pollen germination and pollen tube growth on the stigma and in the style. In: Fertilization in higher plants. Linskens H. F. (ed). The University of Chicago Press Journals, 105-118. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201302737150>

Wayne S. J., Shore L. M., Bommer W. H., Tetrick L. E., 2002. The role of fair treatment and rewards in perceptions of organizational support and leader-member exchange. *Journal of Applied Psychology*, 87 (3): 590-598. <https://doi.org/10.1037//0021-9010.87.3.590>

Zhang C., Yang Y. P., Duan Y. W., 2014. Pollen sensitivity to ultraviolet-B (UV-B) suggests floral structure evolution in alpine plants. *Scientific reports*, 4: 4520. <https://doi.org/10.1038/srep04520>

Zhang Y., Sastry S. I., Bielory L., Georgopoulos P. G., 2013. Bayesian analysis of climate change effects on observed and projected airborne levels of birch pollen. *Atmospheric Environment*, 68: 64-73. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.028>

Ziska L. H., Gebhard D. E., Frenz M. D. D. A., Faulkner S., Singer B. D., Straka J. G., 2003. Cities as harbingers of climate change: Common ragweed, urbanization, and public health. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 111 (2): 290-295. <https://doi.org/10.1067/mai.2003.53>

Zonia L., Munnik T., 2008. Vesicle trafficking dynamics and visualization of zones of exocytosis and endocytosis in tobacco pollen tubes. *Journal of Experimental Botany*, 59: 861-873. <https://doi.org/10.1093/jxb/ern007>

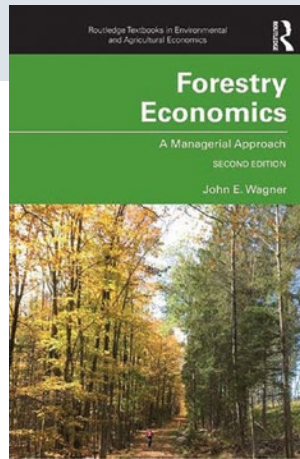
#### Senghor et al. – Credit authorship contribution statement

Contributor role	Contributor names
Data Curation	M. Bendriss Amraoui, C. Senghor
Formal Analysis	M. Bendriss Amraoui, C. Senghor, F.-E. Saouab
Funding Acquisition	Sidi Mohamed Ben Abdellah University
Investigation	M. Bendriss Amraoui, C. Senghor
Methodology	M. Bendriss Amraoui, C. Senghor
Project Administration	M. Bendriss Amraoui, C. Senghor, F.-E. Saouab
Resources	Sidi Mohamed Ben Abdellah University
Supervision	M. Bendriss Amraoui
Validation	M. Bendriss Amraoui
Visualization	M. Bendriss Amraoui, F.-E. Saouab
Writing – Original Draft Preparation	C. Senghor, M. Bendriss Amraoui
Writing – Review & Editing	M. Bendriss Amraoui, F.-E. Saouab

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](mailto:bft@cirad.fr) - ISSN : L-0006-579X



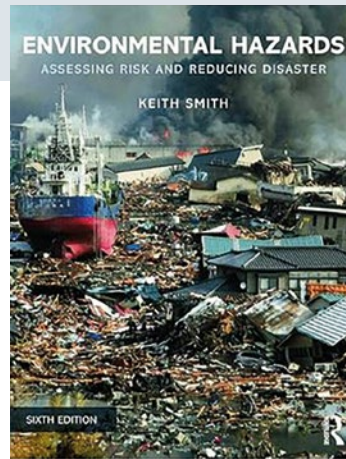
WAGNER J. E., 2024. **FORESTRY ECONOMICS – A MANAGERIAL APPROACH – 2<sup>ND</sup> EDITION.** UNITED STATES OF AMERICA, ROUTLEDGE, 620 P.

*Forestry Economics* introduces students and practitioners to the economics of managing forests and forest enterprises. The book adopts the approach of managerial economics textbooks and applies this to the unique problems and production processes faced by managers of forests and forest enterprises. What many future forest and natural resource managers need is to understand what economic information is and how to use it to make better business and management decisions. John E. Wagner draws on his 30 years of experience teaching and working in the field of forest resource economics to present students with an accessible understanding of the unique production processes and problems faced by forest and other natural resource managers. The second edition has been updated to include: Expanded discussion of compounding, discounting, and capital budgeting, as well as an expanded discussion of when to replace a capital asset that has (i) costs but no direct revenue stream such as a machine; (ii) costs and a direct annual revenue stream such as a solar array; or (iii) costs and a periodic revenue stream illustrated by the forest rotation problem. New practical examples to provide students with applications of the concepts being discussed in the text, most notably on New Zealand and a Radiata Pine (*Pinus radiata*) Plantation. A brand-new chapter that develops business plans for for-profit businesses to illustrate how a business plan is derived from the economic information contained within the Architectural Plan for Profit and how it can be used to make business decisions about continuing to operate a business or to start a new business. This textbook is an invaluable source of clear and accessible information on forestry economics and management not only for economics students, but also for students of other disciplines and those already working in forestry and natural resources.

*Abstract adapted from the publisher's abstract.*

Taylor & Francis, 2385 Executive Center Drive Suite 320, Boca Raton, FL 33431, USA.

[www.routledge.com](http://www.routledge.com)



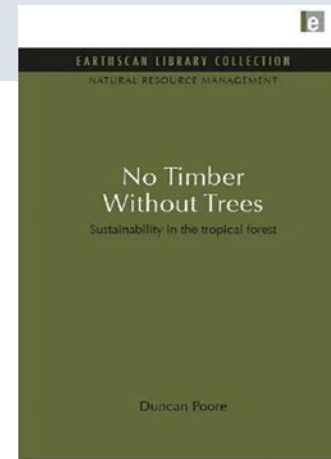
SMITH K., 2023. **ENVIRONMENTAL HAZARDS – ASSESSING RISK AND REDUCING DISASTER – 6<sup>TH</sup> EDITION.** UNITED STATES OF AMERICA, ROUTLEDGE, 504 P.

The much expanded sixth edition of *Environmental Hazards* provides a fully up-to-date overview of all the extreme events that threaten people and what they value in the 21st century. It integrates cutting-edge material from the physical and social sciences to illustrate how natural and human systems interact to place communities of all sizes, and at all stages of economic development, at risk. It also explains in detail the various measures available to reduce the ongoing losses to life and property. Part One of this established textbook defines basic concepts of hazard, risk, vulnerability and disaster. Attention is given to the evolution of theory, to the scales and patterns of disaster impact and to the optimum management strategies needed to minimize the future impact of damaging events. Part Two employs a consistent chapter structure to demonstrate how individual hazards, such as earthquakes, severe storms, floods and droughts, plus biophysical and technological processes, create distinctive impacts and challenges throughout the world. The ways in which different societies can make positive responses to these threats are placed firmly in the context of sustainable development and global environmental change. *Environmental Hazards* is a clearly-written, authoritative account of the causes and consequences of the extreme natural and technological processes that cause death and destruction across the globe. It draws on the latest research findings to guide the reader from common problems, theories and policies to explore practical, real-world situations and solutions. This carefully structured and balanced book captures the complexity and dynamism of environmental hazards and has become essential reading for students of every kind seeking to understand this most important contemporary issue.

*Abstract adapted from the publisher's abstract.*

Taylor & Francis, 2385 Executive Center Drive Suite 320, Boca Raton, FL 33431, USA.

[www.routledge.com](http://www.routledge.com)



POORE D., 2009. **NO TIMBER WITHOUT TREES – SUSTAINABILITY IN THE TROPICAL FOREST.** UNITED STATES OF AMERICA, ROUTLEDGE, 276 P.

Much of the world's tropical timber is still supplied from natural forest, but under current systems of management the forests are rapidly becoming exhausted. Unless management practices change to become genuinely sustainable, neither the forests nor the essential contribution of the timber industry to many economies will survive. Duncan Poore reviews the extent to which natural forests are already being sustainably managed for timber production, and looks at how these practices can be enlarged. He places management for timber in the wider context of tropical forest conservation and outlines a strategy for further action. Thoroughly researched and accessibly written, this book will be useful for everyone working or interested in the subject of tropical forests. Foreword by Dato Dr B.C.Y. Freezailah Originally published in 1989

*Abstract adapted from the publisher's abstract.*

Taylor & Francis, 2385 Executive Center Drive Suite 320, Boca Raton, FL 33431, USA.

[www.routledge.com](http://www.routledge.com)

# *Prioria balsamifera* (Vermoesen) Breteler et *Prioria oxyphylla* (Harms) Breteler : traits d'histoire de vie et perspectives pour des recherches futures

Vivien BBIDJO<sup>1,2</sup>  
Claude MANDE<sup>3,4</sup>  
Faustin MBAYU<sup>2,5</sup>  
Roger KATUSI<sup>6</sup>  
Janvier LISINGO<sup>6,7</sup>

<sup>1</sup> Institut Supérieur Pédagogique de Bunia  
Département de Biologie-Chimie  
B.P. 340 Bunia  
5410305 Ituri  
République démocratique du Congo

<sup>2</sup> Université de Kisangani  
Faculté de Gestion des Ressources Naturelles Renouvelables  
Département d'Agronomie Générale  
B.P. 2012 Kisangani  
5110400 Tshopo  
République démocratique du Congo

<sup>3</sup> Université de Kisangani  
Faculté des Sciences  
Département d'Écologie et Gestion des Ressources Animales  
B.P. 2012 Kisangani  
5110400 Tshopo  
République démocratique du Congo

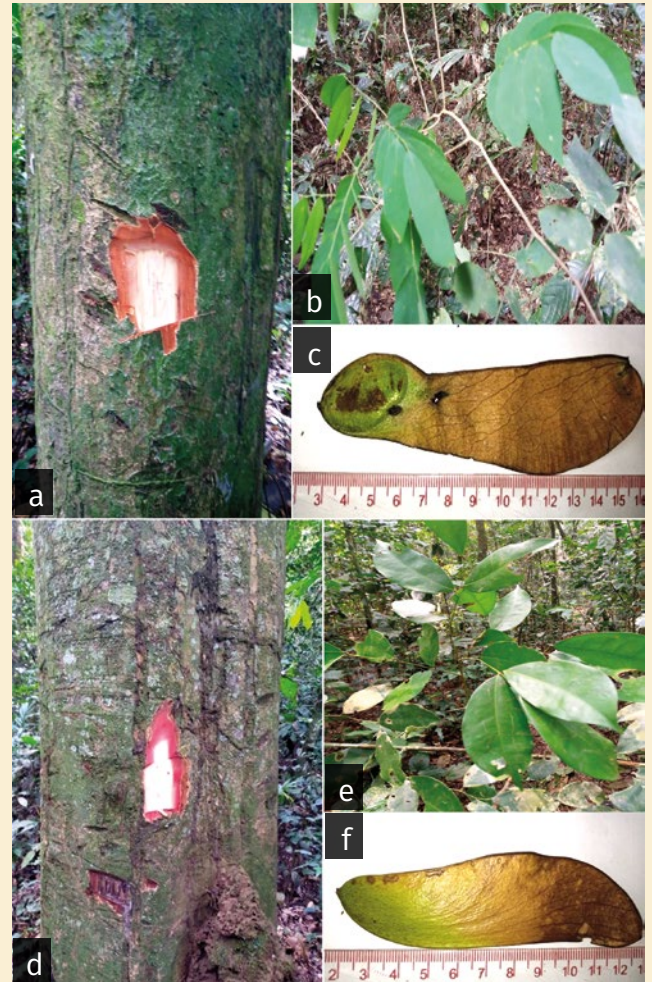
<sup>4</sup> Université de Kisangani  
Centre de Surveillance de la Biodiversité  
Département d'Écologie et Biodiversité des Ressources Terrestres  
B.P. 2012 Kisangani  
5110400 Tshopo  
République démocratique du Congo

<sup>5</sup> Université Shalom de Bunia  
Faculté des Sciences Agronomiques  
Département des Eaux et Forêts  
B.P. 304 Bunia  
5410101 Ituri  
République démocratique du Congo

<sup>6</sup> Université de Kisangani. Faculté des Sciences  
Département d'Écologie et Gestion des Ressources Végétales  
B.P. 2012 Kisangani  
5110400 Tshopo  
République démocratique du Congo

<sup>7</sup> Université de Kisangani  
Laboratoire d'Écologie et Aménagement Forestier  
B.P. 2012 Kisangani  
5110400 Tshopo  
République démocratique du Congo

**Auteur correspondant / Corresponding author:**  
Vivien BBIDJO – [vivienbbidjo@yahoo.fr](mailto:vivienbbidjo@yahoo.fr)



## Photos 1.

a) Tranche sur écorce de *Prioria balsamifera* ;  
b) Feuilles de *P. balsamifera* ; c) Fruit de *P. balsamifera* ;  
d) Tranche sur écorce de *P. oxyphylla* ;  
e) Feuilles de *P. oxyphylla* ; f) Fruit de *P. oxyphylla*.  
a) Slices from the bark of *Prioria balsamifera* ;  
b) Leaves of *P. balsamifera* ; c) Fruit of *P. balsamifera* ;  
d) Slices from the bark of *P. oxyphylla* ;  
e) Leaves of *P. oxyphylla* ; f) Fruit of *P. oxyphylla*.  
Photos V. Bbidjo.

Doi : 10.19182/bft2024.359.a37087 – Droit d'auteur © 2024, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 18 novembre 2022 ;  
date d'acceptation : 12 février 2024 ; date de publication : 29 février 2024.



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

## Citer l'article / To cite the article

Bbidjo V., Mande C., Mbayu F., Katusi R., Lisingo J., 2024. *Prioria balsamifera* (Vermoesen) Breteler et *Prioria oxyphylla* (Harms) Breteler : traits d'histoire de vie et perspectives pour des recherches futures. Bois et Forêts des Tropiques, 359 : 85-95. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2024.359.a37087>

## RÉSUMÉ

***Prioria balsamifera* (Vermoesen) Breteler et *Prioria oxyphylla* (Harms) Breteler : traits d'histoire de vie et perspectives pour des recherches futures**

*Prioria balsamifera* (Vermoesen) Breteler et *Prioria oxyphylla* (Harms) Breteler présentent un grand intérêt sur le marché international de bois d'œuvre. Leur attrait commercial a exacerbé leur exploitation. Cet article présente la synthèse bibliographique des connaissances relatives aux traits de vie de ces espèces afin de mettre en évidence les points sur lesquels les nouvelles recherches devront se focaliser. La revue de la littérature montre que peu d'études ont été réalisées sur ces espèces. Cependant, les données disponibles renseignent que *P. balsamifera* et *P. oxyphylla* ont une structure spatiale qui varie d'une région à une autre, allant d'une répartition aléatoire à une répartition agrégée, ce qui suggère que les facteurs exogènes auraient une influence sur leur structure. Chez *P. balsamifera*, les événements phénologiques (défeuillaison, floraison et fructification) sont annuels et réguliers au niveau de l'espèce, mais irréguliers au niveau de l'individu. Les graines de *P. balsamifera*, stockées durant deux semaines, n'exigent pas de prétraitement avant semis et présentent une durée de germination pouvant aller jusqu'à 3 mois et un faible pouvoir germinatif (45 %). Bien que sa croissance soit lente en plantation, *P. balsamifera* présente une meilleure croissance sous un ombrage moyen en forêt dégradée. Le tempérament semi-héliophile est admis pour ces deux espèces. Des investigations sur les facteurs déterminant la structure spatiale de ces espèces, leurs populations reproductrices, les paramètres régulant leurs floraisons, leurs fructifications, la dispersion de leurs diaspores ainsi que la dynamique de leurs cohortes juvéniles doivent être approfondies afin de proposer un modèle approprié pour leur gestion durable.

**Mots-clés :** *Prioria balsamifera*, *Prioria oxyphylla*, taxonomie, description botanique, aire de distribution, génétique, structure de population, sylviculture, commerce du bois.

## ABSTRACT

***Prioria balsamifera* (Vermoesen) Breteler and *Prioria oxyphylla* (Harms) Breteler: life-history traits and prospects for future research**

*Prioria balsamifera* (Vermoesen) Breteler and *Prioria oxyphylla* (Harms) Breteler are much valued by the international timber trade, but their commercial attractiveness has brought them under threat of over-exploitation. This article summarises the findings of a review of the literature on the known life traits of these species, in order to highlight the points on which new researches should focus. The review shows that few studies have been carried out on these species. However, the available data indicates that the spatial structure of *P. balsamifera* and *P. oxyphylla* varies from one region to another and ranges from random to aggregated distribution, which suggests that it is influenced by exogenous factors. For *P. balsamifera*, phenological events (leaf fall, flowering, and fruiting) are annual and regular at the species level, but irregular at the individual level. *P. balsamifera* seeds, stored for two weeks, do not require pre-treatment before sowing. They have a low germination rate (45%) and germination takes up to 3 months. Although *P. balsamifera* is slow-growing in plantations, it grows best under medium shade in degraded forest. It is accepted that both species are semi-heliophilic in temperament. Investigations into the factors determining the spatial structure of these species, their reproductive populations, the parameters regulating flowering, fruiting, dispersal of their diaspores, and the dynamics of their juvenile cohorts need to be taken further in order to propose an appropriate model for managing them sustainably.

**Keywords:** *Prioria balsamifera*, *Prioria oxyphylla*, taxonomy, botanical description, distribution, genetics, population structure, sylviculture, timber trade.

## RESUMEN

***Prioria balsamifera* (Vermoesen) Breteler y *Prioria oxyphylla* (Harms) Breteler: características de la historia de vida y perspectivas para futuras investigaciones**

Las especies *Prioria balsamifera* (Vermoesen) Breteler y *Prioria oxyphylla* (Harms) Breteler presentan un gran interés en el mercado internacional de la madera de construcción. Su atractivo comercial ha intensificado su explotación. Este artículo presenta la síntesis bibliográfica de los conocimientos relativos a las características de vida de estas especies para sacar a la luz los puntos sobre los que se deberían centrar las nuevas investigaciones. La revisión de la literatura muestra que se han realizado pocos estudios sobre estas especies. Sin embargo, los datos disponibles indican que *P. balsamifera* y *P. oxyphylla* tienen una estructura espacial que varía de una región a otra, yendo de una distribución aleatoria a una distribución agregada, lo que sugiere que los factores exógenos podrían influir en la estructura. En *P. balsamifera*, los eventos fenológicos (defoliación, floración y fructificación) son anuales y regulares a escala de la especie, pero irregulares a escala individual. Las semillas de *P. balsamifera*, almacenadas durante dos semanas, no requieren pretratamiento antes de la siembra y presentan un período de germinación que puede alcanzar hasta tres meses, así como un bajo potencial germinativo (45 %). Aunque su crecimiento sea lento en plantación, *P. balsamifera* crece mejor bajo una sombra media en un bosque degradado. Se admite el temperamento semihelófilo para estas dos especies. Deben profundizarse las investigaciones sobre los factores que determinan la estructura espacial de estas especies, sus poblaciones reproductivas, los parámetros que regulan sus floraciones y fructificaciones, la dispersión de sus diásporas, así como la dinámica de sus cohortes juveniles, para elaborar un modelo adecuado a su gestión sostenible.

**Palabras clave:** *Prioria balsamifera*, *Prioria oxyphylla*, taxonomía, descripción botánica, área de distribución, genética, estructura de población, silvicultura, comercio de la madera.



## Introduction

Le genre *Prioria* Griseb., 1860 appartient à la famille des Fabaceae, sous-famille des Caesalpinioideae (Lewis, 2005 ; Bruneau *et al.*, 2008). Ce genre comporte 14 espèces, dont une espèce (*P. copaifera* Griseb.) présente dans les régions tropicales d'Amérique centrale et d'Amérique du Sud. Six autres espèces sont réparties dans les forêts tropicales humides d'Asie et du Pacifique : *P. pinnata* (Roxb. ex DC.) Breteler, *P. alternifolia* (Elm.) Breteler, *P. micrantha* (B.L. Burtt) Breteler, *P. novoguineensis* (Verdc.) Breteler, *P. platycarpa* (B.L. Burtt) Breteler et *P. tenuicarpa* (Verdc.) Breteler. Les 7 espèces africaines de ce genre sont *P. balsamifera* (Vermoesen) Breteler, *P. bucholzii* (Harms) Breteler, *P. gilbertii* (J. Léonard) Breteler, *P. joveri* (Normand ex Aubrév.) Breteler, *P. manii* (Baill.) Breteler, *P. msoo* (Harms) Breteler et *P. oxyphylla* (Harms) Breteler (Breteler, 1999). Deux de ces sept espèces africaines (*P. balsamifera* et *P. oxyphylla*) présentent un grand intérêt pour le marché international de bois d'œuvre. Ces deux espèces figurent parmi les 10 premières espèces de bois d'œuvre les plus importantes exportées par certains pays, dont le Gabon, le Nigéria et la République démocratique du Congo (RDC) (Cobbinah et Obeng, 2011; Lemmens, 2011). Bien que le bois de *P. balsamifera* (communément appelé tola) soit considéré comme le plus exporté sur le marché international par rapport à celui de *P. oxyphylla* (communément appelé tchitola), l'incertitude règne sur les quantités exactes de bois de chacune de ces deux espèces vendues sur le marché international, car ils seraient exportés en lots mélangés (Lemmens, 2011). L'exportation en lots mélangés de bois de ces deux espèces sur le marché international peut être trompeuse pour les utilisateurs qui se basent souvent sur les qualités de bois au regard des usages qu'ils en font. Partant de cette situation, il est important de clarifier certains traits de ces deux espèces les plus commercialisées du genre *Prioria*, et dont les populations naturelles ont connu un déclin suite à une exploitation intensive et à la dégradation ou perte de leur habitat (Cobbinah et Obeng, 2011 ; Lemmens, 2011 ; Vanden Abeele *et al.*, 2019). Si *P. balsamifera* a été placée sur la liste rouge de l'IUCN (2020) comme espèce en danger (Cobbinah et Obeng, 2011), ce n'est pas le cas de *P. oxyphylla* (Sepulchre *et al.*, 2008) qui est considérée comme une espèce moins préoccupante, connaissant cependant une décroissance démographique et une baisse constante du nombre d'individus matures (Hills, 2019). Par ailleurs, peu de travaux de recherche ont été réalisés sur ces deux espèces, malgré leur importance économique. Les connaissances sur leur écologie et leur système de reproduction demeurent fragmentaires (Batsiellili, 2008 ; Angoboy et Toirambe, 2018), ce qui constitue un obstacle majeur pour leur gestion durable (Sepulchre *et al.*, 2008). Cette revue de la littérature permet de rassembler les informations existantes retraçant les traits de vie de ces deux espèces du genre *Prioria* et de fixer les axes sur lesquels les futures recherches devront être focalisées afin de définir les meilleures stratégies à mettre en œuvre pour leur gestion durable.

Les recherches bibliographiques ont été réalisées en consultant les bases de données fournies par les moteurs de recherche Google Scholar, la base de données du Conservatoire et Jardin botaniques de la ville de Genève, la base de données de Tropicos et la base de données du Muséum National d'Histoire Naturelle. La combinaison des mots-clés suivants a été utilisée en français et en anglais : *Prioria*, *Prioria balsamifera*, *Prioria oxyphylla*, *Oxystigma oxyphyllum*, *Pterygopodium oxyphyllum*, *Pterygopodium balsamiferum*, *Gossweilerodendron balsamiferum*, tola, tchitola, écologie, reproduction, commerce du bois, taxonomie, description botanique, aire de distribution, génétique, structure de population, sylviculture.

## Descripteurs biologiques de *P. balsamifera* et *P. oxyphylla*

### Considérations taxonomiques

Les espèces du genre *Prioria* ont connu une importante évolution dans leur dénomination, exceptée l'espèce américaine *P. copaifera* Griseb. En 1999, Breteler révisait le genre *Prioria*, jadis limité à l'espèce américaine *P. copaifera*, en y rattachant les genres *Gossweilerodendron*, *Pterygopodium* et *Oxystigma* originaires d'Afrique tropicale. Le genre *Oxystigma* a été décrit par Harms (1897) à partir de l'espèce *O. manii*. En 1915, Harms décrit le genre *Pterygopodium* en se basant sur l'espèce *P. oxyphyllum* Harms du Cameroun (Harms, 1915). Une deuxième espèce, *P. balsamiferum* Vermoesen, découverte en RDC, y a été ajoutée par Vermoesen en 1923 (Breteler, 1999). En 1925, à partir des fleurs, Harms revoit la classification du genre *Pterygopodium* en créant le genre *Gossweilerodendron* pour la deuxième espèce. Ainsi, *P. balsamiferum* Vermoesen devint *G. balsamiferum* (Vermoesen) Harms. En 1957, la tentative de placer le genre *Oxystigma* dans *Prioria* n'avait pas abouti, suite aux résultats des travaux de Léonard (1950, 1957) dont l'objet était de différencier les deux genres. Ses résultats avaient établi une différence entre ces deux genres au niveau des folioles opposées et des bractéoles soudées chez *Prioria*, contrairement à ce qui était observé chez *Oxystigma*. Cependant, Breteler (1999) avait constaté que ces bractéoles de *Prioria* étaient imbriquées et libres. Par ailleurs, les fleurs de *Prioria*, considérées comme nettement pédicellées par Léonard en 1957, ont été notées comme des fleurs subsessiles par Breteler (1999), qui avait également vu des fleurs presque sessiles chez *G. balsamiferum*. Si les nervations commencent à la base du fruit ou latéralement chez *Prioria* et *Gossweilerodendron*, elles peuvent aussi commencer au sommet du fruit chez *Oxystigma* (Breteler, 1999). En outre, la différence de nombre de sépales observée chez *Gossweilerodendron* (4, rarement 5) et *Oxystigma* (5, rarement 6) n'a pas été considérée comme une source importante de différenciation générique par Breteler (1999), étant donné que la réduc-

tion du nombre de sépales est également notée dans plusieurs genres de Detarieae et de Macrolobieae, considérée comme une caractéristique commune. Une importante différence a été constatée au niveau de la taille des graines de *Gossweilerodendron*, de *Prioria* et d'*Oxystigma* par Breteler (1999). Cependant, la germination de leurs graines est hypogée avec une absence d'hypocotyle et d'épicotyle (Breteler, 1999). Ces ressemblances des caractéristiques morphologiques entre *Gossweilerodendron*, *Prioria* et *Oxystigma* avaient motivé Breteler en 1999 à reconnaître l'unique genre *Prioria*, autrefois uniquement réservé à l'espèce américaine *P. copaifera*. Ainsi, *Gossweilerodendron balsamiferum* (Vermoesen) Harms devenait *Prioria balsamifera* (Vermoesen) Breteler tandis qu'*Oxystigma oxyphyllum* (Harms) Léonard se rattachait à *Prioria oxyphylla* (Harms) Breteler. *Prioria balsamifera* et *P. oxyphylla* sont endémiques du continent africain.

### Description botanique

La description botanique de *P. balsamifera* et *P. oxyphylla* est détaillée dans plusieurs ressources documentaires spécialisées en botanique (Tailfer, 1989 ; Détienne, 1991 ; Breteler, 1999 ; Cobbinah et Obeng, 2011 ; Lemmens, 2011 ; Meunier *et al.*, 2015). *Prioria balsamifera* et *P. oxyphylla* sont de grands arbres atteignant en moyenne 50 m de hauteur et plus de 1,5 m de diamètre. Leurs feuilles sont composées pennées, ordinairement stipulées. Les fleurs sont blanchâtres, dépourvues de pétales, avec les sépales imbriqués dans les boutons floraux qui se fendent suivant un axe

déterminé. Les fleurs sont pentamères et disposées sur plus de 2 rangs. Les bractéoles non valvaires sont très caduques. Ces espèces ont des anthères dorsifixes et des ovaires uniloculaires avec un seul ovule. Les fruits, de couleur brunâtre, sont des gousses ailées samaroïdes indéhiscentes. La couleur de l'écorce de ces espèces, le nombre de leurs folioles, la forme et la longueur de leurs fruits, le nombre de leurs sépales ainsi que la longueur de leurs bractées permettent de les différencier (tableau I). Par ailleurs, ces espèces se différencieraient au niveau d'autres caractères tels que la couleur et l'odeur dégagée par la tranche, la base et le sommet du limbe (photos 1), la forme des nervures secondaires du limbe, etc. (tableau I).

### Phénologie

Il existe peu d'études phénologiques sur ces deux espèces de *Prioria*. On sait toutefois que *P. balsamifera* et *P. oxyphylla* sont des espèces brièvement caducifoliées (Meunier *et al.*, 2015). Au Gabon, la fructification de *P. balsamifera* a lieu de mars à avril et d'août à octobre (Doucet, 2003 ; Meunier *et al.*, 2015). Le diamètre minimum de fructification (DMF) et le diamètre de fructification régulière (DFR) de *P. balsamifera* au Gabon sont respectivement de 34 cm et 75 cm (Doucet, 2003 ; Sepulchre *et al.*, 2008). En RDC, dans la région du Mayombe, les événements phénologiques (défeuillaison, floraison, fructification) de *P. balsamifera* sont annuels et réguliers au niveau de l'espèce, mais irréguliers au niveau de l'individu. La défeuillaison se produit entre septembre et novembre avec un pic en

**Tableau I.**

Comparaison des caractéristiques botaniques de *Prioria balsamifera* et *P. oxyphylla*.  
*Comparison of the botanical characteristics of *Prioria balsamifera* and *P. oxyphylla*.*

Caractéristiques	<i>Prioria balsamifera</i>	<i>Prioria oxyphylla</i>
<b>Tronc</b>	Grand arbre de 55 m de haut et de 1,5 m de diamètre, à cime sphérique et feuillage ouvert. Tronc très cylindrique.	Grand arbre atteignant 50 m de haut et 1,5 m de diamètre. Tronc très cylindrique.
<b>Écorce</b>	Écorce gris brun, se détache en écailles verticales plus ou moins rectangulaires.	Écorce gris verdâtre à brun sombre, s'exfoliant en lamelles allongées, soit fissurée et tavelée de dépressions concaves.
<b>Tranche</b>	Tranche rose-rouge avec l'intérieur blanchâtre, à légère odeur balsamique, flammée de nombreuses lignes ondulantes, épaisse à très épaisse, finement fibreuse, s'imbibant tardivement d'une substance gélatineuse opaque et gris jaunâtre à l'état sec.	Tranche rouge foncé, mi-épaisse, à légère odeur d'amande amère.
<b>Feuilles</b>	6-10 folioles alternes, elliptiques, de 3 à 13 cm de long, sommet arrondi, points translucides présents, pétioles de 3 à 4 mm généralement tordus, nervures secondaires tracées jusqu'à la marge, base du limbe asymétrique.	5-9 folioles alternes, coriaces, elliptiques, de 4 à 14 cm de long, sommet arrondi, points translucides difficilement visibles, nervure médiane bien saillante en dessous, nervures secondaires arquées et peu distinctes, base du limbe asymétrique.
<b>Fleurs</b>	Blanches apétales, disposées sur plus de rangs, 5-mères, bractées plus longues que les pédicelles de boutons floraux adultes, sépales ordinairement 4, glabres à l'intérieur, disque absent.	Blanches apétales, disposées sur plus de rangs, 5-mères, bractées plus courtes que les pédicelles des boutons floraux adultes, sépales ordinairement 5, peu pubescents à l'intérieur, disque présent.
<b>Fruits</b>	Gousses ailées, samaroïdes, indéhiscentes, brunâtres, de 9 à 17 cm de long, un côté légèrement incurvé et l'autre arrondi, attaché par l'aile membraneuse nervurée à partir de la base ou d'un côté du fruit.	Gousses ailées, samaroïdes, indéhiscentes, brunâtres, de 6 à 13 cm de long, ovale-lancéolé, attaché par l'aile membraneuse marquée de nervures longitudinales partant du sommet.

Sources : Tailfer, 1989 ; Détienne, 1991 ; Breteler, 1999 ; Cobbinah et Obeng, 2011 ; Lemmens, 2011, Meunier *et al.*, 2015.

octobre, la floraison entre octobre et décembre avec un pic en décembre et la fructification entre décembre et février avec le pic en février. Le diamètre minimum de floraison et de fructification de cette espèce dans cette région est de 33,8 cm (Angoboy et Toirambe, 2018). Cependant, la période de fructification de *P. oxyphylla* au Cameroun se situe entre mars et avril alors qu'au Gabon, elle s'étend de février à avril (Dainou et al., 2021).

### Pollinisation et dispersion des graines

*Prioria balsamifera* et *P. oxyphylla* sont des espèces hermaphrodites (Sepulchre et al., 2008 ; Meunier et al., 2015). Cependant, le mode de pollinisation chez ces espèces reste méconnu et mériterait d'être examiné, d'autant plus que l'allogamie est possible chez certaines espèces hermaphrodites (Sepulchre et al., 2008). *Prioria balsamifera* et *P. oxyphylla* sont des espèces anémochores (Sepulchre et al., 2008 ; Meunier et al., 2015). Les fruits de *P. balsamifera* sont dispersés par le vent, quelquefois assez loin du semencier (Cobbinah et Obeng, 2011). En RDC, Kidikwadi et al. (2015) ont noté qu'au moins 50 % des diaspores de *P. balsamifera* sont dispersées à une distance allant de 26 à 35 m du semencier à Luki et à Kiyaka, alors qu'à Yoko la distance moyenne de dissémination des diaspores de cette espèce est de 50,39 m avec un minimum de 20 m et un maximum de 95 m (Shaumba, 2009). Par ailleurs, la distance moyenne de dispersion des graines de *P. oxyphylla* à Yoko a été évaluée à 50,62 m avec un minimum de 3 m et un maximum de 98 m (Shaumba, 2009).

### Caractérisation génétique

Des marqueurs microsatellites de *P. balsamifera* et *P. oxyphylla* ont été développés par Vanden Abeele et al. (2019). À partir de deux populations de *P. balsamifera* et de *P. oxyphylla*, l'une provenant de Yangambi et l'autre de Luki, en RDC, il a été constaté une faible diversité génétique dans les populations de ces deux espèces avec une consanguinité quasi absente chez *P. balsamifera*. Cependant, la fréquence d'allèles nuls (allèles n'ayant pu être amplifiés par PCR, *Polymerase Chain Reaction*) était élevée pour plusieurs loci dans les populations de *P. oxyphylla* (Vanden Abeele et al., 2019), cet artefact ayant tendance à sous-estimer le taux d'hétérozygotie au sein d'une population et à biaiser les liens de parenté entre individus ou le degré d'apparentement entre populations (Callen et al., 1993 ; Chapuis et Estoup, 2006).

### Caractéristiques de bois

Bien que parfois exportés en mélange sur le marché international, des différences existent entre les caractéristiques des bois de *P. balsamifera* et *P. oxyphylla*. Les valeurs

de la plupart des propriétés physiques et mécaniques du bois de *P. balsamifera* sont inférieures à celles de *P. oxyphylla*, mais les bois des deux espèces ont la même sensibilité aux variations d'humidité (tableau II). Les bois de *P. balsamifera* et *P. oxyphylla* sont brunâtres, mais légèrement rosés chez *P. balsamifera* (Gérard et al., 1998, 2017) et marqués de traînées noirâtres chez *P. oxyphylla* (Sallenave, 1957 ; Tailfer, 1989 ; Gérard et al., 1998 ; Lemmens, 2011). Les bois de ces deux espèces ont un fil droit et sont parfois contrefilés (Gérard et al., 1998 ; Cobbinah et Obeng, 2011 ; Lemmens, 2011). Ces bois sont légers (Sallenave, 1957 ; Meunier et al., 2015), mais tendres chez *P. balsamifera* (Tailfer, 1989 ; Gérard et al., 1998 ; Malele, 2003) et mi-durs chez *P. oxyphylla* (Sallenave, 1957 ; Tailfer, 1989 ; Gérard et al., 1998). Ils ont des grains fins (Gérard et al., 1998) et présentent une faible rétractabilité (Gérard et al., 1998). À l'état frais, le bois de *P. balsamifera* a une odeur légèrement poivrée (Gérard et al., 1998 ; Cobbinah et Obeng, 2011). *Prioria balsamifera* et *P. oxyphylla* ont des bois qui résistent aux attaques des champignons (Gérard et al., 1998 ; Cobbinah et Obeng, 2011 ; Lemmens, 2011). Cependant, contrairement au bois de *P. balsamifera*, celui de *P. oxyphylla* est résistant aux termites (Lemmens, 2011). Les bois de ces espèces séchent, se scient et s'usinent facilement (Gérard et al., 1998 ; Cobbinah et Obeng, 2011 ; Lemmens, 2011). Si le bois de *P. balsamifera* se tranche et se déroule facilement, le tranchage et le déroulage du bois de *P. oxyphylla* nécessitent un léger étuvage (Gérard et al., 1998). Par ailleurs, le sciage et le placage du bois de *P. oxyphylla* présentent des taches sombres dues aux exsudations de résine (Gérard et al., 1998 ; Lemmens, 2011).

**Tableau II.**

Caractéristiques physiques et mécaniques des bois de *Prioria balsamifera* et *P. oxyphylla*.  
*Physical and mechanical characteristics of Prioria balsamifera and P. oxyphylla wood.*

Propriétés	<i>Prioria balsamifera</i>	<i>Prioria oxyphylla</i>
Dureté Monnin*	2,3	3,3
Masse volumique*	470 à 580 kg/m <sup>3</sup>	600 à 750 kg/m <sup>3</sup>
Point de saturation des fibres	27 %	26 %
Retrait volumique total	7,70 %	11 %
Retrait tangentiel total	5,50 %	7,50 %
Retrait radial total	2,40 %	3,90 %
Contrainte de rupture en compression parallèle*	37 MPa	58 MPa
Contrainte de rupture en flexion statique*	73 MPa	108 MPa
Module d'élasticité longitudinal*	8800 MPa	12000 MPa
Sensibilité aux variations d'humidité de l'air	Moyenne	Moyenne
Stabilité en service	Bonne	Bonne à moyenne

Source : Gérard et al., 1998 ; \* valeurs déterminées à un taux d'humidité du bois de 12% ; 1 MPa = 1 N/mm<sup>2</sup>.

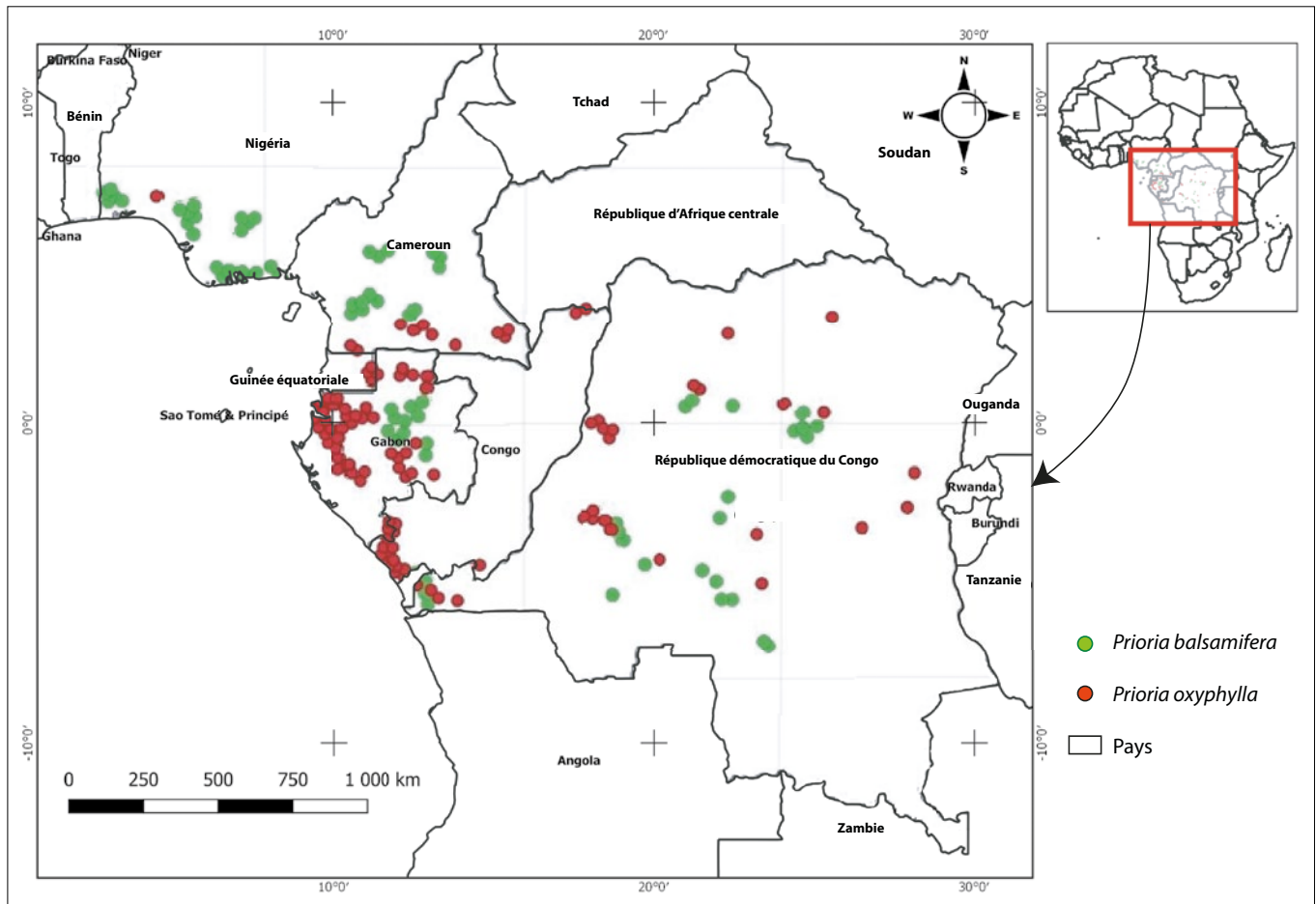
## Traits écologiques de ces espèces

### Distribution géographique

*P. balsamifera* et *P. oxyphylla* couvrent presque la même aire de distribution géographique en Afrique Centrale. Les deux espèces sont visibles du sud du Nigéria jusqu'en RDC et vers le sud jusqu'au Cabinda, province de l'Angola (Cobbinah et Obeng, 2011 ; Lemmens, 2011). Bien que l'aire de répartition de *P. oxyphylla* soit assez grande, cette espèce est disséminée et n'est pas commune dans bien des régions au sein même de son aire (Lemmens, 2011) (figure 1). *P. balsamifera* et *P. oxyphylla* sont des espèces centro-guinéo-congolaises (Doucet, 2003 ; Sepulchre et al., 2008) qui sont devenues vulnérables suite à leur exploitation intensive et leur raréfaction dans des aires de plus en plus restreintes (Sepulchre et al., 2008). *Prioria balsamifera* est connue localement sous différents noms : tola (Congo), tola branca (Angola), alo, gondo (Cameroun), agba, moboron (Nigéria), emolo (Gabon) (Nancy, 1989 ; Tailfer, 1989). En revanche, *P. oxyphylla* est communément appelée kitola, tchitola (Congo), emoli, emolo, m'babou (Gabon), gondo (Cameroun), lolagbola (Nigéria) (Nancy, 1989 ; Tailfer, 1989). En RDC, ces espèces portent divers noms, selon différents dialectes (Tailfer, 1989).

### Exigences abiotiques

*P. balsamifera* est rencontrée dans la forêt semi-décidue de basse altitude jusqu'à 600 m (Breteler, 1999 ; Cobbinah et Obeng, 2011), mais on peut la trouver aussi dans la forêt sempervirente (Meunier et al., 2015). Si elle préfère les sols ferrugineux profonds, elle peut aussi pousser sur des sols sablonneux (Cobbinah et Obeng, 2011). Par ailleurs, *P. oxyphylla* se rencontre en forêt semi-décidue (Meunier et al., 2015) et en forêt sempervirente de basses terres sur des sols bien drainés (Lemmens, 2011). Des études réalisées en RDC ont montré que *P. balsamifera* et *P. oxyphylla* se rencontrent plus souvent sur des sols sableux (Amani, 2017). *P. balsamifera* s'adapte mieux sur le sommet de collines ou en pente, mais rarement dans les vallées (Kidikwadi et al., 2015). Le peuplement de *P. balsamifera* est lié à l'influence des caractères climatiques propres au milieu auquel elle est adaptée (White, 1983). Les travaux de Lubini (1997) et Doucet (2003) ont permis de classer *P. balsamifera* parmi les espèces des forêts climaciques.



**Figure 1.** Carte de distribution de *Prioria balsamifera* et *P. oxyphylla* adaptée des cartes de Breteler (1999).  
Distribution map of *Prioria balsamifera* and *P. oxyphylla* adapted from maps by Breteler (1999).

**Tableau III.**

Densité de *Prioria balsamifera* et *P. oxyphylla* dans différentes régions.  
 Density of *Prioria balsamifera* and *P. oxyphylla* in different regions.

Nom scientifique	Densité	DHP	Localisation	Types de forêt	Références
<i>Prioria balsamifera</i>	3,57 tiges/ha	≥ 10 cm	RDC (Yoko)	Forêt dense humide semi-décidue	Shaumba, 2009
	125 tiges/ha	≥ 10 cm	RDC (Luki)	Forêt dense sèche semi-caducifoliée	Lubini, 1997
	194 tiges/ha	≥ 10 cm	RDC (Luki)	Forêt dense sèche semi-caducifoliée	Kidikwadi <i>et al.</i> , 2015
	5 tiges/ha	≥ 10 cm	RDC (Kiyaka)	Forêt galerie	Kidikwadi <i>et al.</i> , 2015
	0,05 à 0,1 tiges/ha	≥ 60 cm	Cameroun	-	Cobbinah et Obeng, 2011
	4 à 6 tiges/ha	≥ 60 cm	Gabon et République du Congo	-	Cobbinah et Obeng, 2011
<i>Prioria oxyphylla</i>	3,58 tiges/ha	≥ 10 cm	RDC (Yoko)	Forêt dense humide semi-décidue	Shaumba, 2009

- : absence d'information ; RDC : République démocratique du Congo ; DHP : Diamètre à Hauteur de Poitrine.

### Tempérament, structure de population et distribution spatiale

Le tempérament de *P. balsamifera* a été diversement présenté selon les auteurs. *Prioria balsamifera* est qualifiée d'héliophile (Malele, 2003 ; Sepulchre *et al.*, 2008), de tolérante à l'ombre (Cobbinah et Obeng, 2011), d'héliophile modérée (Doucet, 2003 ; Kidikwadi *et al.*, 2015) ou de semi-héliophile (Shaumba, 2009 ; Meunier *et al.*, 2015). Il en est de même pour *P. oxyphylla* qui est considérée comme semi-héliophile (Doucet, 2003 ; Shaumba, 2009) ou tolérante à l'ombre (Meunier *et al.*, 2015). Pour ces deux espèces, il découle des travaux de la majorité de ces auteurs un consensus sur une certaine tolérance à l'ombrage. En effet, les plantules de ces espèces préfèrent un couvert léger pour s'installer et peuvent subsister plus longtemps et même croître dans le sous-bois, bien qu'une ouverture du couvert puisse améliorer leur croissance. D'après toutes ces observations, on peut considérer que ces deux espèces de *Prioria* ont un tempérament semi-héliophile.

La structure de la population d'une espèce est la distribution du nombre d'arbres de cette espèce par classe de diamètre (Rollet, 1974). Peu d'études ont été réalisées sur la structure de population de ces espèces. La structure diamétrique de *P. oxyphylla* étudiée au Gabon présente une courbe en forme de S étiré (Doucet, 2003). Par contre, *P. balsamifera* présente une structure diamétrique avec une courbe en cloche au Gabon (Doucet, 2003). En RDC, la structure diamétrique de *P. balsamifera* varie de J inversé (Shaumba, 2009 ; Kidikwadi *et al.*, 2015) à cloche (Kidikwadi *et al.*, 2015) selon le milieu. La structure diamétrique de population d'une même espèce peut varier d'une forêt à une autre (Forni, 1997). Cela peut être justifié par des circonstances propres à chaque forêt (Degueret, 2002), notamment le degré de la régénération naturelle, de la densité ainsi que des conditions écologiques de chaque espèce (Nature+, 2011).

Par ailleurs, l'analyse de la densité de *P. balsamifera* et *P. oxyphylla* dans les différentes formations forestières en Afrique centrale indique une fluctuation de la densité de ces deux espèces dans les différentes régions. En RDC, la densité de ces espèces dépend du type de forêt. Ainsi, dans des forêts denses sèches semi-caducifoliées en RDC, *P. balsamifera* présente une densité élevée d'individus à DHP ≥ 10 cm (diamètre à hauteur de poitrine ; tableau III).

La structure spatiale est l'une des caractéristiques majeures que l'on observe lors de l'étude d'une communauté, constituant l'une des propriétés les plus fondamentales de tout groupe d'organismes biologiques (Ludwig et Reynolds, 1988). *Prioria balsamifera* et *P. oxyphylla* sont des espèces non grégaires au Gabon (Meunier *et al.*, 2015). La distribution spatiale de ces espèces étudiée en RDC montre que *P. balsamifera* présente une répartition spatiale variant d'une région à une autre, allant d'une répartition aléatoire à une répartition agrégative (Lebrun et Gilbert, 1954 ; Shaumba, 2009 ; Kidikwadi *et al.*, 2015). Par ailleurs, *P. oxyphylla* présente un caractère grégaire à Yoko, dans le nord-est de la RDC (Shaumba, 2009).

### Régénération

Les études consacrées à la régénération de ces essences sont rares. Au Gabon, les semis de *P. balsamifera* s'installent préférentiellement dans le sous-bois jusqu'à ce que leur croissance soit inhibée par le manque de lumière (Doucet, 2003). Dans la forêt semi-décidue du sud-ouest de la RDC, jusqu'à 7 800 semis et jeunes pieds de *P. balsamifera* par hectare ont été comptés (Cobbinah et Obeng, 2011). La germination des graines de *P. balsamifera* peut être grégaire sous un couvert fermé, mais les clairières assureraient une bonne croissance des plantules (Cobbinah et Obeng, 2011).

## Sylviculture

Les informations disponibles sur la sylviculture et la domestication de ces essences sont rares.

Les graines de *P. balsamifera*, stockées durant deux semaines au maximum à une température ambiante, n'exigent pas de prétraitement avant semis. Aucune donnée relative à leur conservation à moyen et à long terme n'est disponible (Daïnou *et al.*, 2021). Le pouvoir germinatif moyen de ces graines est de 45 %.

Après semis, la levée est rapide mais étalée sur 1 à 3 mois (Daïnou *et al.*, 2021). La croissance de *P. balsamifera* est assez lente en pépinière avec une moyenne de 40 cm de hauteur entre 9 et 10 mois.

L'accroissement diamétrique moyen de *P. balsamifera* à partir de deux classes en dessous du diamètre minimum d'exploitabilité (80 cm) est de 6,5 mm/an (Sepulchre *et al.*, 2008). *Prioria balsamifera* a présenté, au Gabon, un accroissement annuel moyen en diamètre à hauteur de poitrine de tiges de plus de 10 cm de diamètre de 5 à 6 mm/an (Doucet, 2003). La croissance de *P. balsamifera* est plutôt lente en plantation. Les meilleurs résultats sont obtenus sous un ombrage moyen en forêt dégradée (tableau IV ; Daïnou *et al.*, 2021).

## Aménagement

L'aménagement forestier durable vise à réglementer le prélèvement des arbres au sein d'une population afin de garantir la disponibilité des tiges sur le long terme. Le diamètre minimum d'exploitabilité (DME) est un outil de base de l'aménagement durable. Il tient compte de la structure diamétrique des populations d'arbres et de la nécessité de préserver de l'abattage la fraction des semenciers devant assurer la régénération (Durrieu de Madron *et al.*, 1998). Le diamètre minimum d'exploitabilité de *P. balsamifera* a été estimé à 80 cm au Gabon (Meunier *et al.*, 2015 ; Sepulchre *et al.*, 2008 ; Cobbinah et Obeng, 2011), au Congo, en RDC et en République centrafricaine (RCA), et à 100 cm au Cameroun (Sepulchre *et al.*, 2008 ; Cobbinah et Obeng, 2011). Celui de *P. oxyphylla* a été évalué à 70 cm au Gabon (Lemmens, 2011 ; Meunier *et al.*, 2015), 60 cm au Cameroun et 80 cm en RCA et en RDC (Lemmens, 2011).

## Commerce et usages du bois de ces espèces

### Commerce

Le bois de *P. balsamifera* est commercialisé sous le nom de tola (Tailfer, 1989 ; Cobbinah et Obeng, 2011 ; Meunier *et al.*, 2015) ou d'agba (Cobbinah et Obeng, 2011), tandis que celui de *P. oxyphylla* est connu dans le commerce sous le nom de tchitola (Tailfer, 1989 ; Lemmens, 2011 ; Meunier *et al.*, 2015). Les quantités exactes de bois de ces espèces vendues sur le marché international restent imprécises, car ils seraient exportés en lots mélangés (Lemmens, 2011).

Cependant, ces dernières années, on note une variation des volumes de bois exportés de ces deux espèces avec une tendance à la baisse. Cela serait lié à l'exploitation intensive qu'elles ont connue et à la dégradation progressive de leur habitat (Cobbinah et Obeng, 2011 ; Lemmens, 2011 ; Vanden Abeele *et al.*, 2019). Les informations existantes renseignent qu'entre 1961 et 1970, le Nigéria a exporté en moyenne 22 000 m<sup>3</sup> de grumes et 11 000 m<sup>3</sup> de sciages de *P. balsamifera* par an (Cobbinah et Obeng, 2011). L'exportation des grumes gabonaises est passée de 20 500 m<sup>3</sup> en 1991 à 56 000 m<sup>3</sup> en 2001. En 1999, *P. balsamifera* figurait à la septième place sur la liste des bois d'œuvre gabonais d'exportation les plus importants. Ensuite, les exportations gabonaises ont chuté à 13 800 m<sup>3</sup> en 2005 (Cobbinah et Obeng, 2011). En 2004, le Congo a exporté 13 000 m<sup>3</sup> de grumes au prix moyen de 141 US\$/m<sup>3</sup>, et 1 000 m<sup>3</sup> de placages au prix moyen de 309 US\$/m<sup>3</sup>. Le Cameroun a exporté 5 600 m<sup>3</sup> de grumes en 1999, 12 300 m<sup>3</sup> en 2000, 3 000 m<sup>3</sup> en 2001, et seulement 850 m<sup>3</sup> en 2003. En 2006, de petites quantités de contreplaqués ont été exportées par le Cameroun au prix moyen de 867 US\$/m<sup>3</sup> (Cobbinah et Obeng, 2011). S'agissant de *P. oxyphylla*, le Gabon exporte de petites quantités de bois de cette espèce, essentiellement des placages. En 2006, de petites quantités de placages ont été également exportées par le Congo au prix moyen de 359 US\$/m<sup>3</sup> (Lemmens, 2011). En RDC, *P. balsamifera* et *P. oxyphylla* figurent parmi les 36 espèces les plus importantes en termes de demande sur

le marché (Malele, 2003 ; AGEDUFOR, 2017 ; Diansambu et Mumbere, 2019). Le volume de bois de *P. balsamifera* exporté reste toujours supérieur à celui de *P. oxyphylla*.

### Usages

La durabilité naturelle des bois de *P. balsamifera* et *P. oxyphylla* permet leur utilisation (sans traitement) en classe d'emploi 2 (NF EN 335, 2013), et considérés à ce titre comme bois d'intérieur et d'extérieur sous couvert. Cependant, si le bois de *P. balsamifera* convient bien pour la

**Tableau IV.**

Performance en plantation de *Prioria balsamifera*.  
Plantation performance of *Prioria balsamifera*.

Performance en plantation	Trouées (plantation de 4 ans)	Forêt dégradée (plantation de 7 ans)	Layon forestier (plantation de 10 ans)
Mortalité annuelle	6%	1,60%	4,30%
Croissance moyenne en hauteur	17 cm/an	59 cm/an	20 cm/an
Croissance moyenne en diamètre	1 mm/an	4 mm/an	1 mm/an
Hauteur	145 cm	380 cm	233 cm
Diamètre	12 mm	37 mm	12 mm

Source : Daïnou *et al.*, 2021.

fabrication de placages tranchés décoratifs et de placages pour panneaux contreplaqués (emballage, coffrage, décoration) (Gérard *et al.*, 1998 ; Cobbinah et Obeng, 2011), celui de *P. oxyphylla* est souvent utilisé dans la menuiserie d'intérieur et dans l'industrie du contreplaqué (Sallenave, 1957 ; Gérard *et al.*, 1998 ; Meunier *et al.*, 2015). Traditionnellement, le fût de ces deux espèces est utilisé pour la fabrication des pirogues (Tailfer, 1989 ; Cobbinah et Obeng, 2011 ; Lomba *et al.*, 2017). Par ailleurs, en RDC, la résine de *P. balsamifera* est employée par les populations riveraines comme vernis pour protéger les meubles contre les parasites de bois (Malele, 2003).

## Conclusion et perspectives de recherche

Cette synthèse bibliographique a dressé l'état des connaissances actuelles sur les deux espèces africaines du genre *Prioria*, *P. balsamifera* et *P. oxyphylla*. Ces espèces sont bien documentées en termes de description botanique, de caractéristiques et d'usages de leur bois. Par contre, les connaissances sur les traits biologiques et écologiques de ces espèces demeurent insuffisantes et méritent d'être approfondies à travers les deux axes suivants :

### • Phénologie, dispersion des graines et caractéristiques génétiques :

Les données existantes montrent que les études sur la phénologie de ces espèces sont inégalement réalisées au niveau spécifique sur l'ensemble de leurs zones de distribution. Les informations concernant le diamètre minimum de fructification régulière de ces espèces demeurent insuffisantes et méritent davantage d'investigations scientifiques. Le diamètre minimum de fructification est considéré comme le seuil à partir duquel les premières floraisons et fructifications sont observées. Il est autrement appelé diamètre minimum de fertilité. C'est un outil de base pour la détermination du diamètre minimum d'exploitabilité d'une espèce (Menga *et al.*, 2012). Les recherches orientées sur la phénologie de ces deux espèces sur l'ensemble de leurs aires de distribution dans le but de déterminer leur période de floraison et de fructification et les diamètres y afférant, ainsi que leur période de défeuillaison dans toute leur aire de distribution, doivent être réalisées afin d'appréhender les rôles du climat sur leurs phénologies, afin de bien comprendre leurs cycles de vie pour une meilleure planification de leur exploitation et de certaines activités sylvicoles, comme la récolte de leurs semences. Par ailleurs, les distances de dispersion des graines de ces espèces ont été jusque-là évaluées par la méthode des quadrats, une méthode consistant à délimiter 5 quadrats de 100 m × 100 m autour du semencier sélectionné pour l'étude de la dispersion des graines. Les graines sont dénombrées dans le quadrat et leur distance par rapport au semencier est évaluée. Toute graine se trouvant dans le quadrat délimité est considérée comme descendant de ce semencier. Cette méthode ne permet pas de déterminer

avec précision la distance de dispersion des graines et leur paternité. Par ailleurs, les études génétiques de ces espèces se basant sur des marqueurs moléculaires restent indispensables pour analyser leur système de reproduction afin de préciser la distance de dispersion de leurs graines, pollens et gènes et d'inférer les impacts de leur exploitation intensive sur la diversité génétique de leur population. Les marqueurs microsatellites, développés par Vanden Abeele *et al.* (2019), pourront contribuer grandement à la réalisation de ces études. Les études réalisées par différents chercheurs (Duminil *et al.*, 2016 ; Monthe *et al.*, 2017 ; Assumani *et al.*, 2021) ont ainsi démontré l'importance de l'intégration des outils de génétique moléculaire dans l'évaluation du système de reproduction et d'agrégation spatiale chez certaines espèces de valeur des forêts tropicales.

### • Tempérament, structure spatiale et aménagement :

Bien qu'on puisse considérer que les deux espèces de *Prioria* aient un tempérament semi-héliophile, leur tolérance à l'ombrage a été différemment appréciée dans la littérature. Des études approfondies visant à quantifier les besoins en lumière de chacune de ces deux espèces sont ainsi nécessaires pour une meilleure définition de leurs tempéraments. La littérature montre que la structure spatiale de ces espèces varie d'une région à une autre. La structure spatiale d'une espèce est souvent définie par certains facteurs, notamment les facteurs morphologiques, les facteurs environnementaux et les facteurs phytosociologiques (Dale, 1999). À ces facteurs, il faut ajouter la superficie concernée par son étude (Nshimba, comm. pers.). Des études de la structure des populations de ces deux espèces et celles intégrant tous les facteurs précités devront être réalisées pour mieux comprendre le mécanisme de régénération de ces espèces et bien définir leurs structures spatiales. Enfin, des études sur la détermination de taux de croissance dans les différentes classes de diamètre, de taux de mortalité et de taux de recrutement des arbres d'avenir de ces espèces devraient être aussi privilégiées, afin d'avoir des informations nécessaires pour la modélisation de la dynamique de leurs populations à long terme.

## Références

- AGEDUFOR (Appui à la Gestion Durable des Forêts), 2017. Panorama du secteur forestier industriel de la République démocratique du Congo. Appui à la Gestion Durable des Forêts, 11 p.
- Amani A. C., 2017. An assessment of distance decay within wood forest layers in Central African's semi-deciduous forests. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 10 (6) : 14-26. <https://hdl.handle.net/10568/111840>
- Angoboy B. I., Toirambe B. B., 2018. Phénologie et diamètre de reproduction de *Prioria balsamifera* (Vermeesen) Breteler (Tola) dans la réserve de Biosphère de Luki au Mayombe, R. D. Congo. *Congo Sciences*, 6 (1) : 44-51.

- Assumani A. D.-M., Monthe F., Bourland N., Boyemba F., Hardy O. J., 2021. Seed and pollen dispersal and fine-scale spatial genetic structure of a threatened tree species: *Pericopsis elata* (Harms) Meeuwen (Fabaceae). *Tree Genetics & Genomes*, 17 (27): 1-14. <https://doi.org/10.1007/s11295-021-01509-8>
- Batsielili A., 2008. Phénologie et régénération des espèces ligneuses arborées en forêt tropicale humide : cas d'Afrormosia (*Pericopsis elata*) et du Tola (*Prioria balsamifera*) en RDC. Mémoire inédit, Agro Paris Tech-ENGREF, Centre de Montpellier, 58 p. [https://infodoc.agroparistech.fr/index.php?lvl=notice\\_display&id=137884](https://infodoc.agroparistech.fr/index.php?lvl=notice_display&id=137884)
- Breteler F. J., 1999. A revision of *Prioria*, including *Grossweileroendron*, *Kingiodendron*, *Oxystigma*, and *Pterygopodium* (Leguminosae – Caesalpinioideae – Detarieae) with emphasis on Africa. *Herbarium Vadense, Wageningen Agricultural University Papers*, 99-3, 61 p. <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/282989>
- Bruneau A., Mercure M., Lewis P. G., Herendeen P., 2008. Phylogenetic patterns and diversification in the caesalpinoid legumes. *Botany*, 86: 697-718. <https://doi.org/10.1139/B08-058>
- Callen D. F., Thompson A. D., Shen Y., Phillips H. A., Richards R. I., Mulley J. C., et al., 1993. Incidence and origin of "null" alleles in the (AC)n microsatellite markers. *American Journal of Human Genetics*, 52 (5): 922-927. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1682051/pdf/ajhg00063-0076.pdf>
- Charpuis M., Estoup A., 2006. Microsatellite null alleles and estimation of population differentiation. *Molecular Biology and Evolution*, 24 (3): 621-631. <https://doi.org/10.1093/molbev/msl191>
- Cobbinah J. R., Obeng E. A., 2011. *Prioria balsamifera* (Vermoesen) Breteler. In: PROTA4U. Lemmens R. H. M. J., Louppe D., Oteng-Amoako A. A. (eds.). <https://www.prota4u.org/>
- Daïnou K., Tosso F., Brack C., Bourland N., Forni E., Hubert D., et al., 2021. Guide pratique des plantations d'arbres des forêts denses humides d'Afrique. Presses Agronomiques de Gembloux, Belgique, 319 p. <http://hdl.handle.net/2268/259075>
- Dale M. R. T., 1999. Spatial pattern analysis in plant ecology. Cambridge University Press, Cambridge, 326 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511612589>
- Degueret A., 2002. Étude de la régénération des espèces commerciales dans les trouées d'exploitation au Gabon. Mémoire de Master, ENGREF, Montpellier, 92 p. [https://infodoc.agroparistech.fr/index.php?lvl=notice\\_display&id=129288](https://infodoc.agroparistech.fr/index.php?lvl=notice_display&id=129288)
- Détienne P., 1991. Clé de reconnaissance par les feuilles des légumineuses des forêts du Cameroun, Congo, Gabon et de la R.C.A. *Bois et Forêts des Tropiques*, 230 : 39-52. [https://agritrop.cirad.fr/403718/1/document\\_403718.pdf](https://agritrop.cirad.fr/403718/1/document_403718.pdf)
- Diansambu M. I., Mumbere C., 2019. État des lieux des acteurs de la filière forêt bois en République démocratique du Congo. ERAIFT, RDC, 85 p. [https://www.atibt.org/wp-content/uploads/2020/03/Rapport-final\\_Etude-sur-l%C3%A9tat-de-lieu-du-secteur-forestier-1.pdf](https://www.atibt.org/wp-content/uploads/2020/03/Rapport-final_Etude-sur-l%C3%A9tat-de-lieu-du-secteur-forestier-1.pdf)
- Doucet J.-L., 2003. L'alliance délicate de la gestion et de la biodiversité dans les forêts du Gabon. Thèse de doctorat, Université de Liège-Gembloux Agro Bio Tech, Gembloux, 390 p. [https://www.gembloux.ulg.ac.be/gestion-des-ressources-forestieres/upload/documents/th\\_doct\\_doucet.pdf](https://www.gembloux.ulg.ac.be/gestion-des-ressources-forestieres/upload/documents/th_doct_doucet.pdf)
- Duminil J., Mendene A. D. T., Ndiade B. D., Doucet J.-L., Loo J., Hardy O. J., 2016. High selfing rate, limited pollen dispersal and inbreeding depression in the selfing rate, limited pollen dispersal and inbreeding depression in the emblematic African rain forest tree *Baillonella toxisperma* – Management implications. *Forest Ecology and Management*, 379: 20-29. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2016.08.003>
- Durrieu de Madron L., Favrichon V., Dupuy B., 1998. Croissance et productivité en forêt dense humide : bilan des expérimentations dans le dispositif de Mopri-Côte d'Ivoire (1978-1992). France, Cirad-Forêt, 82 p. <http://forafri.cirad.fr/ressources/forafri/14.pdf>
- Forni E., 1997. Types de forêts dans l'est du Cameroun et étude de la structure diamétrique de quelques essences. Mémoire de DEA : Université de Liège-Gembloux Agro-Bio Tech, 75 p. <https://agritrop.cirad.fr/575662/>
- Gérard J., Kouassi E., Daigremont C., Détienne P., Fouquet D., Vernay M., 1998. Synthèse sur les caractéristiques technologiques de référence des principaux bois commerciaux africains. Série FORAFRI, Document 11, CIRAD-Forêt, 185 p. <https://agritrop.cirad.fr/515643/>
- Gérard J., Guibal D., Paradis S., Cerre J. C., 2017. Tropical Timber Atlas. Quæ Editions, 1002 p. [https://www.itto.int/files/itto\\_project\\_db\\_input/3028/Technical/E-TMT-SDP-010-12-R1-MTropical%20Timber%20Atlas.pdf](https://www.itto.int/files/itto_project_db_input/3028/Technical/E-TMT-SDP-010-12-R1-MTropical%20Timber%20Atlas.pdf)
- Harms H., 1897. *Oxystigma manii*. In: Die Natürlichen Pflanzenfamilien nebst ihren Gattungen und wichtigeren Arten, insbesondere den Nutzpflanzen, unter Mitwirkung zahlreicher hervorragender Fachgelehrten begründet. Engler A., Krause K., Pilger R., Prantl K. Wilhelm Engelmann, Leipzig, 194-195. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.4635>
- Harms H., 1915. *Pterygopodium oxyphyllum*. In: Die Natürlichen Pflanzenfamilien nebst ihren Gattungen und wichtigeren Arten, insbesondere den Nutzpflanzen, unter Mitwirkung zahlreicher hervorragender Fachgelehrten begründet. Engler A., Krause K., Pilger R., Prantl K. Wilhelm Engelmann, Leipzig, 125. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.4635>
- Hills, R. 2019. *Prioria oxyphylla*. The IUCN Red List of Threatened Species 2019: e.T62027002A62027008. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2019-3.RLTS.T62027002A62027008.en>
- IUCN (International Union for Conservation of Nature and Natural Resources), 2020. IUCN Red list of threatened species. IUCN. [www.iucnredlist.org](http://www.iucnredlist.org)
- Kidikwadi E. T., Lubini C. A., Luyindula N., Belesi H. K., 2015. Note préliminaire sur l'écologie et mesure de biomasse de *Prioria balsamifera* dans les stations forestières de l'INERA de Luki et Kiyaka en RD Congo. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 11 (4) : 914-927. <https://ijias.issr-journals.org/abstract.php?article=IJIAS-15-075-02>
- Lebrun J.-P., Gilbert G., 1954. Une classification écologique des forêts du Congo. INEAC, Série scientifique No 63, Bruxelles, 89 p.
- Lemmens R. H. M. J., 2011. *Prioria oxyphylla* (Harms) Breteler. In : PROTA4U. Lemmens R. H. M. J., Louppe D., Oteng-Amoako A. A. (eds.). <https://www.prota4u.org/>
- Léonard J., 1950. Observations sur les genres africains *Oxystigma* et *Pterygopodium* (Caesalpinioideae). *Institut Royal Colonial Belge, Bulletin*, 21 : 744-753.
- Léonard J., 1957. Genre des Cynometreae et des Amherstieae Africaines (Leguminosae - Caesalpinioideae). *Mémoires de l'Académie royale de Belgique*, 30 (2) : 130-132.
- Lewis G. P., 2005. Legumes of the world. Royal Botanic Garden, Kew, 577 p.



Lomba B. C., Lituka Y. B., Asimonyio A. J., Koto-te-Nyiwa N., 2017. Analyse structurale des diamètres de *Musanga cecropioides*, *Prioria balsamifera* et *Prioria oxyphylla* et leur vulnérabilité face à l'exploitation illicite dans la réserve forestière de Yoko (Ubundu, République démocratique du Congo). International Journal of Innovation and Scientific Research, 33 (1): 141-147. <https://ijisr.issr-journals.org/abstract.php?article=IJSR-17-121-07>

Lubini A., 1997. La végétation de la réserve de biosphère de Luké au Mayombe (Zaïre). Meise : Jardin botanique national de Belgique, 155 p.

Ludwig A. J., Reynolds J. F., 1988. Statistical ecology: A primer on methods and computing. Wiley-Interscience, 44 p. [https://www2.ib.unicamp.br/profs/thomas/NE002\\_2011/maio12/LR%201988%20StatEcol%20sel1.pdf](https://www2.ib.unicamp.br/profs/thomas/NE002_2011/maio12/LR%201988%20StatEcol%20sel1.pdf)

Malele 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 (*non publié*), 44 p.

Menga P., Bayol N., Nasi R., Fayolle A., 2012. Phénologie et diamètre de fructification du Wengé, *Milletia laurentii* De Wild. : implications pour la gestion. Bois et Forêts des Tropiques, 312 (2) : 31-41. <https://doi.org/10.19182/bft2012.312.a20501>

Meunier Q., Moubogou C., Doucet J.-L., 2015. Les arbres utiles du Gabon. Les Presses Agronomiques de Gembloux, Gembloux, Belgique, 340 p. <http://hdl.handle.net/2268/183815>

Monthe F. K., Hardy O. J., Doucet J.-L., Loo J., Duminiel J., 2017. Extensive seed and pollen dispersal and assortative mating in the rain forest tree *Entandrophragma cylindricum* (Meliaceae) inferred from indirect and direct analyses. Molecular Ecology, 26: 5279-5291. <https://doi.org/10.1111/mec.14241>

Nancy R., 1989. Complete Index of Common Names : Supplement to Tropical Timbers of the World (AH 607), 45 p. <https://fr.scribd.com/doc/133184764/Wood>

Nature+, 2011. Révision du plan d'aménagement de l'UFA 09.021 & Identification des HVC, délimitation des séries de conservation et état des populations des essences exploitées pour l'UFA 09.022. Nature+, 1 p.

NF EN 335, 2013. Durabilité du bois et des matériaux à base de bois - Classes d'emploi : définitions, application au bois massif et aux matériaux à base de bois. Editions AFNOR, 17 p. <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-335/durabilite-du-bois-et-des-materiaux-a-base-de-bois-classes-d-emploi-definitivi/fa154470/41323#AreasStoreProductsSummaryView>

Rollet B., 1974. L'architecture des forêts denses humides sempervirentes de plaine. C.T.F.T., Nogent-sur-Marne, 298 p.

Sallenave P., 1957. Les bois tropicaux en menuiserie de bâtiment. Bois et Forêts des Tropiques, 53 : 39-46. <https://revues.cirad.fr/index.php/BFT/article/view/18682>

Sepulchre F., Dainou K., Doucet J.-L., 2008. Étude de la vulnérabilité de 18 essences ligneuses commerciales d'Afrique centrale reprises sur la liste rouge IUCN. Nature+, ATIBT et Gembloux Agro-Bio-Tech, 51 p. [https://www.atibt.org/files/upload/technical-publications/Etude\\_vulnerabilite\\_Gembloux\\_2008.pdf](https://www.atibt.org/files/upload/technical-publications/Etude_vulnerabilite_Gembloux_2008.pdf)

Shaumba K., 2009. Analyse de la régénération et de la répartition spatiale des Fabaceae-Caesalpinioideae dans la forêt de Yoko (Kisangani, R.D. Congo) : cas de *Prioria balsamifera* J. Léonard, *Prioria oxyphylla* (Vermoesen) Breteler et *Scorodophloeus zenkeri* Harms. Mémoire de DEA : Université de Kisangani, Kisangani

(République démocratique du Congo), 140 p. <https://cd.chm-cbd.net/implementation/centre-de-sureveillance-de-la-biodiversite-csb/botanique/ecologie-forestiere/analyse-de-la-regeneration-et-de-la-repartition-spatiale-des-fabaceae>

Tailfer Y., 1989. La forêt dense d'Afrique centrale. Identification des principaux arbres, tome 1 et 2. CTA, 1271 p.

Vanden Abeele S., Hardy O. J., Beeckman H., Angoboy I. B., Janssens S., 2019. Genetic markers for species conservation and timber tracking: development of microsatellite primers for the tropical african tree species *Prioria balsamifera* and *Prioria oxyphylla*. Forests, 10 (1037): 1-13. <https://doi.org/10.3390/f10111037>

White F., 1983. The vegetation of Africa. A descriptive memoir to accompany the Unesco/AETFAT/UNSO vegetation map of Africa. UNESCO, 356 p.

### Bbidjo et al. – Déclaration de contribution des auteurs du crédit

Rôle du contributeur	Noms des auteurs
Conceptualisation	V. Bbidjo, J. Lisingo
Gestion des données	V. Bbidjo
Analyse formelle	V. Bbidjo, J. Lisingo
Acquisition du financement	V. Bbidjo
Enquête et investigation	V. Bbidjo
Méthodologie	V. Bbidjo, J. Lisingo
Gestion de projet	V. Bbidjo, J. Lisingo
Ressources	V. Bbidjo, J. Lisingo
Logiciels	V. Bbidjo
Supervision	V. Bbidjo, J. Lisingo
Validation	V. Bbidjo, C. Mande, R. Katusi, F. Mbayu, J. Lisingo
Visualisation	V. Bbidjo, C. Mande, R. Katusi, F. Mbayu, J. Lisingo
Écriture – Préparation de l'ébauche originale	V. Bbidjo
Écriture – Révision et édition	V. Bbidjo, C. Mande, R. Katusi, F. Mbayu, J. Lisingo

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](mailto:bft@cirad.fr) - ISSN : L-0006-579X

RÉSUMÉ DE THÈSE /  
ACADEMIC THESIS ABSTRACT / RESUMEN DE TESIS ACADÉMICAÉconomie du secteur de la biomasse  
lignocellulosique durable et logistique  
des biocarburants en Malaisie

Chu Lee ONG

## RÉSUMÉ

La biomasse lignocellulosique est une ressource renouvelable et non comestible qui peut être utilisée pour produire des biocarburants de manière durable et contribuer ainsi à atténuer le changement climatique tout en participant à la sécurité énergétique. Les pays tropicaux comme la Malaisie sont censés disposer d'abondantes ressources en biomasse, mais les paysages agricoles fragmentés, communs en Asie du Sud-Est, posent des problèmes pour la production de biocarburants qui découlent en grande partie des opérations logistiques et ont un impact négatif sur les économies d'échelle et la viabilité des bioraffineries. Cette thèse vise à comprendre les coûts et les approvisionnements associés au transport de la biomasse, à évaluer les impacts de la fragmentation du paysage pour les bioraffineries et à identifier les emplacements optimaux pour celles-ci. Dix sources de biomasse (résidus agroforestiers de récoltes et de scieries) ont été considérées, en tenant compte des différents facteurs logistiques, scénarios d'approvisionnement et impacts du paysage fragmenté. L'étude a commencé par une simulation du transport de la biomasse à travers la Malaisie péninsulaire, en utilisant le logiciel GRASS GIS pour estimer les approvisionnements et leurs coûts. Quatre-vingt-neuf lieux ont été désignés comme sites potentiels dans chaque district. Le transport de la biomasse représente une proportion importante des dépenses opérationnelles. Les dépenses d'investissement pour les différentes voies de conversion et les coûts des bioraffineries ont été dérivés d'estimations en ordres de grandeur et les approvisionnements ont été simulés. L'étude a identifié quatre sites optimaux pour différents types de biomasse, en présentant le détail des coûts et des approvisionnements. Les deux types de biomasse les plus compétitifs sont la paille de riz et la fibre de palme pressée (FPP). Les coûts pour la FPP varient de 130,6 à 206,3 USD/tonne, donnant 0,47 à 0,97 million de tonnes de biocarburant FPP fermenté par an, et pour la paille de riz de 123,2 à 207,8 USD/tonne, donnant 0,49 à 0,56 million de tonnes de biocarburant fermenté par an. En tonnes d'équivalent pétrole (tep), les deux représentent ensemble 5 à 7 % de la consommation annuelle de pétrole de la Malaisie. Ces résultats suggèrent, de manière assez contre-intuitive, qu'une abondance de biomasse n'entraîne pas nécessairement une baisse des coûts des biocarburants, car des facteurs tels que la fragmentation spatiale et la teneur en eau amplifient les coûts de transport. Notre analyse souligne la nécessité d'une planification stratégique, avec de plus gros camions pour le transport, le séchage de la matière première en amont et la création de centres de consolidation locaux pour gérer efficacement la biomasse. Elle souligne la nécessité d'une approche plus globale et stratégique permettant de comprendre les spécificités des zones d'approvisionnement et de réaliser ainsi le potentiel de la Malaisie en matière de production durable de biocarburants.

**Mots-clés :** biocarburant, biomasse, bioraffinerie, matière première, paysage fragmenté, lignocellulose, résidus, coûts du transport, déchets, Malaisie.

Economics of sustainable lignocellulose biomass  
and biofuel logistics in Malaysia

## ABSTRACT

Lignocellulose biomass is an inedible and renewable resource that can be used to produce biofuels sustainably and thus help to mitigate climate change while helping to ensure energy security. Tropical countries like Malaysia are assumed to have abundant biomass resources, but the fragmented farming landscapes common in Southeast Asia raise challenges for biofuel production, which largely stem from logistics operations and have an adverse impact on economies of scale and the viability of biorefineries. This thesis seeks to understand the costs and supplies associated with biomass transport, assess the impacts of landscape fragmentation on biorefineries, and identify optimum biorefinery locations. Ten sources of biomass (agroforestry residues from fields, sawmills, and processing plants) were considered, taking into account various logistical factors, supply scenarios, and impacts of landscape fragmentation. The study began with a simulation of biomass transport across Peninsular Malaysia, using GRASS GIS software to estimate costs and supplies. Eighty-nine points within each district were designated as potential locations. Biomass transport was recorded as a major cost component in operational expenditures. The capital expenditures for various conversion pathways and biorefinery operations were estimated across relevant orders of magnitude, with the biofuel supplies also being simulated. The study identified four optimum locations for various types of biomass, presenting detailed cost and supply structures. The two most competitive biomass types are rice straw and pressed palm fibre (PPF). Costs ranged a) from 130.6 to 206.3 USD/tonne, yielding 0.47 to 0.97 million tonnes of PPF fermented biofuel per year, and b) 123.2 to 207.8 USD/tonne for rice straw, yielding 0.49 to 0.56 million tonnes of fermented biofuel per year. In tonnes of oil equivalent (toe), both together amounted to 5–7% of Malaysia's annual petroleum consumption. Surprisingly, the findings suggest that an abundance of biomass does not necessarily result in lower biofuel costs, because factors such as spatial fragmentation and moisture content amplify transport costs. Our analysis emphasises the need for strategic planning, including the use of larger trucks, early moisture removal, and the establishment of local consolidation centres to manage biomass effectively. It highlights the need for a more holistic and strategic approach in order to understand supply zone specifics with a view to unlocking Malaysia's potential for sustainable biofuel production.

**Keywords:** biofuel, biomass, biorefinery, feedstock, landscape fragmentation, lignocellulose, residues, transport costs, waste, Malaysia.

Economía del sector de la biomasa  
lignocelulósica sostenible y logística de los  
biocombustibles en Malasia

## RESUMEN

La biomasa lignocelulósica es un recurso renovable e incomedible que puede utilizarse para producir biocombustibles de manera sostenible, contribuyendo a la lucha contra el cambio climático y a la seguridad energética. Aunque los países tropicales como Malasia se supone que tienen abundantes recursos de biomasa, los paisajes agrícolas fragmentados comunes en el sudeste asiático suponen un reto para la producción de biocombustible, a causa de las operaciones logísticas, que afectan a las economías de escala y a la viabilidad de las biorrefinerías. Esta tesis pretende comprender los costes y suministros asociados con el transporte de la biomasa, identificar la ubicación óptima de las biorrefinerías y evaluar los efectos de la fragmentación del paisaje en las biorrefinerías. Se consideraron diez fuentes de biomasa provenientes de residuos agroforestales de campos y molinos, teniendo en cuenta varios factores logísticos, escenarios de suministro y efectos de fragmentación de paisaje. Se comenzó con la simulación de transporte de biomasa a través de la Malasia peninsular, utilizando el software GRASS GIS para estimar costes y suministros. Se designaron 89 puntos en cada distrito como ubicaciones potenciales. Los costes de transporte de biomasa son uno de los componentes principales de los costes operacionales. Se simularon, con estimaciones en órdenes de magnitud, las inversiones de capital para diferentes vías de conversión, los costes de las biorrefinerías y los suministros. El estudio identifica cuatro ubicaciones óptimas para diferentes biomases, y presenta en detalle su coste y sus estructuras de suministro. Las dos biomases más competitivas son la paja de arroz y la fibra de palma prensada (PPF). Con costes que van de 130,6 a 206,3 USD/tonelada, la PPF produciría de 0,47 a 0,97 millones de toneladas de biocombustible fermentado al año. Y la paja de arroz, con costes de 123,2 a 207,8 USD/tonelada, produciría de 0,49 a 0,56 millones de toneladas de biocombustible fermentado al año. En toneladas de petróleo equivalente los dos juntos representarían el 5–7 % del consumo de petróleo anual en Malasia. Sorprendentemente, los resultados sugieren que la abundancia de biomasa no genera necesariamente costes más bajos de biocombustible, ya que factores como la fragmentación espacial y la proporción de humedad amplifican los costes de transporte. El análisis enfatiza la necesidad de una planificación estratégica que incluya la utilización de camiones mayores, un secado previo y el establecimiento de centros de consolidación local para gestionar la biomasa de manera efectiva. Destaca la necesidad de enfoques más holísticos y estratégicos que permitan comprender las especificidades de las zonas de suministro y desbloquear el potencial malayo de biocombustibles sostenibles.

**Palabras clave:** biocombustible, biomasa, biorrefinería, materia prima, fragmentación del paisaje, lignocelulosa, residuos, costes de transporte, desechos, Malasia.

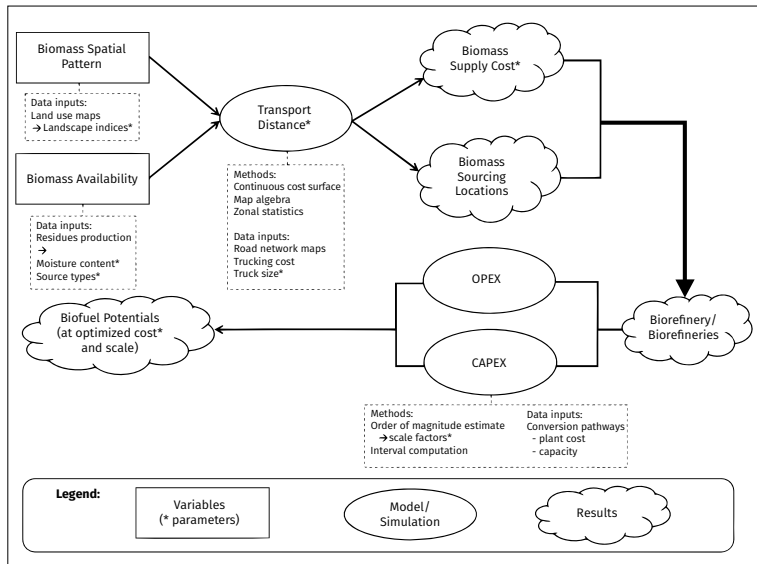


Doi: <https://doi.org/10.19182/bft2024.359.a37446>

Droit d'auteur © 2024, Bois et Forêts des Tropiques © Cirad  
Date de publication : 29 février 2024



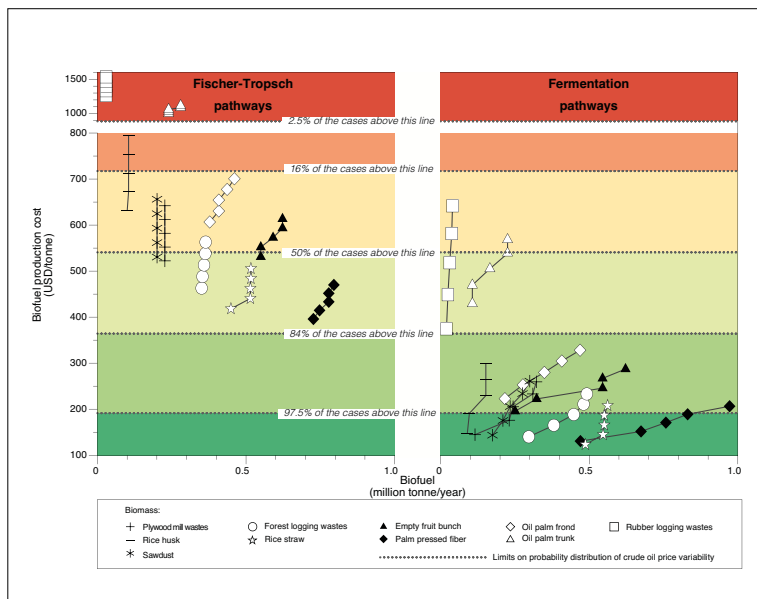
Licence Creative Commons :  
Attribution - Pas de Modification 4.0 International.  
Attribution-4.0 International (CC BY 4.0)



**Figure 1.** Illustration schématique du cadre utilisé pour dériver les deux parties du résultat. Pour la première partie, les outils du logiciel GRASS GIS ont permis de simuler les coûts d'approvisionnement en biomasse et d'identifier les lieux de collecte les plus économiques pour chaque type de biomasse. Cela a permis d'obtenir des scénarios pour les bioraffineries et les dépenses d'exploitation et, combiné avec une estimation des coûts de la transformation chimique, de calculer le potentiel en biocarburants de la Malaisie péninsulaire. Parallèlement, des variables clés et des variables calculées (désignées par →) ont permis d'effectuer des analyses de régression et des analyses de scénarios pour quantifier l'importance et l'impact des différents paramètres afin d'identifier la dynamique de l'économie de la biomasse et des bioraffineries dans le contexte de fragmentation spatiale caractérisant la Malaisie.

**Figure 1.** Schematic diagram illustrating the framework applied to derive the two parts of the result. The first part uses tools in GRASS GIS software to simulate biomass supply costs and identify the least-cost locations for each type of biomass. This produces biorefinery scenarios and operating expenditures and is combined with the chemical plant cost estimation to derive biofuel potential in Peninsular Malaysia. In parallel, key variables and computed variables (denoted by →) were used to perform regression analyses and scenario analyses in order to quantify the significance and impacts of the parameters and to identify the dynamics of biomass and biorefinery economics in the context of spatial fragmentation in Malaysia.

**Figura 1.** El diagrama esquemático ilustra el marco utilizado para obtener los dos partes del resultado. La primera parte utiliza herramientas del software GRASS GIS para simular los costes de suministro de biomasa e identifica las ubicaciones de menor coste para cada tipo de biomasa. Se han generado escenarios de biorrefinerías y gastos operativos, que se combinan con estimaciones de costes de plantas químicas para calcular el potencial en biocombustible de la Malasia peninsular. Paralelamente, se utilizaron variables clave y variables calculadas (indicadas con →) para realizar análisis de regresiones y análisis de escenarios. Esto sirve para cuantificar la importancia y los impactos de los parámetros y para descubrir dinámicas en la economía de la biomasa y de las biorrefinerías en el contexto de fragmentación espacial de Malasia.



**Figure 2.** Comparison entre, d'une part, les coûts de production de biocarburants à des échelles optimisées, par les voies de conversion Fischer-Tropsch et de fermentation, avec des livraisons par camion de 26 tonnes à partir de diverses sources de matières premières lignocellulosiques en Malaisie péninsulaire vers des emplacements optimisés, et d'autre part la variabilité des prix du pétrole brut pendant la période allant d'août 2005 à juillet 2020. Deux types de matières premières, la paille de riz et les fibres pressées de palmier, se sont révélés être les biocarburants les plus compétitifs par la voie de la fermentation, dont les coûts sont inférieurs à 97,5 % de la variabilité des prix du pétrole brut.

**Figure 2.** Comparison between biofuel production costs at optimised scales, via Fischer-Tropsch and fermentation conversion pathways and with 26-tonne truck supplies to optimised locations from various sources of lignocellulose feedstock in Peninsular Malaysia, and the variability of crude oil prices during August 2005 to July 2020. Two types of feedstock, rice straw and palm-pressed fibre, emerged as the most competitive biofuels via the fermentation pathway, where costs are below 97.5% of the variability of crude oil prices.

**Figura 2.** Se comparan con la variabilidad de precios de crudo desde agosto de 2005 hasta julio de 2020, los costes de producción de biocombustible mediante vías de conversión de Fischer-Tropsch y de fermentación a escalas optimizadas, con suministros de diferentes materias primas lignocelulósicas en camiones de 26 toneladas a ubicaciones optimizadas en la Malasia peninsular. Dos materias primas, la paja de arroz y la fibra de palma prensada, mediante la vía de fermentación, son los biocombustibles que resultan más competitivos, con costes inferiores al 97,5 % de la variabilidad en los precios del crudo.

**Graduate and academic degree:** PhD in Bioresource Management

**University:** Institute of Tropical Forestry & Forest Products (INTROP), Universiti Putra Malaysia, Malaysia.

**Date of defence:** 23<sup>rd</sup> March 2023.

**Management and Supervision:** Jean-Marc RODA (Cirad - Direction Générale Délégée à la Recherche et à la Stratégie / Adjunct professor - INTROP - Universiti Putra Malaysia, Serdang, Malaysia).

**Co-supervision:** Paridah Md. TAHIR (INTROP-Universiti Putra Malaysia, Serdang, Malaysia), Marcel DJAMA (ITAFoS-Universiti Putra Malaysia, Serdang, Malaysia), Rashila binti RAMLI (IKMAS - Universiti Kebangsaan Malaysia, Bangi, Malaysia).

**Composition of the jury**

**President:** Nitty Hirawaty binti KAMARULZAMAN (Universiti Putra Malaysia, Serdang, Malaysia).

**Examiners:** Meriem FOURNIER (Centre INRAE Nancy Grand Est, France), Shaufique Fahmi bin Ahmad SIDDIQUE (IKP - Universiti Putra Malaysia, Serdang, Malaysia), Abdul Rahim bin Abdul SAMAD (ITAFoS - Universiti Putra Malaysia, Serdang, Malaysia).

**Language used for writing:** English.

**Funding:** Aerospace Malaysia Innovation Centre (AMIC).

**Access to manuscript:** <https://hal.science/tel-04299963>

**Contact:** Institute of Tropical Forestry & Forest Products (INTROP), Universiti Putra Malaysia, 43400 UPM Serdang, Malaysia. [candice.ocl@gmail.com](mailto:candice.ocl@gmail.com)

## References

- Chen B. J. T., Ong C. L., Babin J., 2017. Cost analysis and GIS-modelling for the production of biofuel from lignocellulosic biomass in biorefineries in Peninsular Malaysia. *ASM Science* (10), Special Issue 2017(1) ICT-Bio, 1-7. <https://www.akademisains.gov.my/asmsj/article/cost-analysis-and-gis-modelling-for-the-production-of-biofuel-from-lignocellulosic-biomass-in-biorefineries-in-peninsular-malaysia-2/>
- Ong C. L., Babin J., Chen J. T., Liew K. E., Roda J. M., 2016. Designing model for biomass transport cost of biofuel refinery in Malaysia. *In: Proceeding of the Burapha University International Conferences*, 610-621.
- Ong C. L., Deprés G., Hollebecq J. E., Shaiffudin Hishamudin M. O., Kamaruddin N., Anugerah A. R., Amir Mustafa A. N., Roda J. M., 2020. Quantifying the effect of landscape structure on transport costs for biorefinery of agricultural and forestry wastes in Malaysia. *GCB Bioenergy*, 12 (11): 910-922. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12740>
- Ong C. L., Roda J.-M., 2020. Data for: Biomass Supply Cost in Peninsular Malaysia - Transportation distances, truck capacity, available biomass quantity, and biomass transport cost in Ringgit Malaysia (MYR) per fresh tonne for Kuala Lumpur, Malaysia and least-cost locations of 10 categories of biomass. CIRAD Dataverse, V1. <https://doi.org/10.18167/DVN1/IQO4L6>



## A guide to multiple-use forest management planning for small and medium forest enterprises



VAN HENBERGEN H., SHONO K., CEDERGREN J., 2023.

## A guide to multiple-use forest management planning for small and medium forest enterprises

ITALY, FAO, 144 P.

This publication discusses the concept, evolution, and requirements of forest management planning, focusing on multiple-use forest management and small and medium forest enterprises (SMFEs). Forest management planning is a document that translates forest policies into a coordinated programme for managing forests over a set period of time, integrating environmental, economic, and social dimensions. It serves various purposes, such as legal documents, concession agreements, and tools for sustainable forest management. Multiple-use forest management recognizes the diverse values and benefits that forests provide beyond timber, such as water regulation, climate change mitigation, biodiversity conservation, and cultural values.

Despite its challenges, forest management planning can contribute to sustainability and optimize the value derived from forests. SMFEs play a crucial role in supporting livelihoods and forest-based economies. However, barriers such as policy environments, lack of support tools, and management challenges need to be addressed. Forest management planning can help overcome these barriers by ensuring legal compliance, mitigating risks, promoting sustainability, and supporting marketing and value chain development. It is also a valuable tool for empowering local forest users, involving stakeholders, and negotiating benefit-sharing arrangements.

The process of forest management planning involves gathering information, defining objectives, developing silvicultural and ecosystem services plans, creating a business plan, planning for unusual events, and establishing a monitoring system. It is an adaptive learning process that continuously evaluates and adapts plans based on the results of forest management activities. Stakeholder engagement is key to developing a socially acceptable forest management plan, starting with identifying stakeholders, creating awareness, informed discussions, and monitoring to keep stakeholders accountable for their agreed responsibilities. Negotiating expectations and building consensus helps identify conflicts and integrate qualitative data to improve decision-making in multiple-use forest management.

In conclusion, forest management planning is essential for sustainable forest management, contributing to the well-being of communities, the environment, and the economy. This guide provides a framework for forest management planning, guiding forest managers through the planning process stepwise and providing advice on information sources needed during the planning process. The framework can be adapted to national and local contexts in line with relevant regulatory requirements.

To download: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cc6780en>

NELSON C. R., HALLETT J. G., ROMERO MONTOYA A. E., ANDRADE A., BESACIER C., BOERGER V., BOUAZZA K., CHAZDON R., COHEN-SHACHAM E., DANANO D., DIEDERICHSEN A., FERNANDEZ Y., GANN G. D., GONZALES E. K., GRUCA M., GUARIGUATA M. R., GUTIERREZ V., HANCOCK B., INNECKEN P., KATZ S. M., MCCORMICK R., MORAES L. F. D., MURCIA C., NAGABHATLA N., POUATY NZEMBIALELA D., ROSADO-MAY F. J., SHAW K., SWIDERSKA K., VASSEUR L., VENKATARAMAN R., WALDER B., WANG Z., WEIDLICH E. W. A., 2024

## STANDARDS OF PRACTICE TO GUIDE ECOSYSTEM RESTORATION

A contribution to the United Nations Decade on Ecosystem Restoration 2021–2030



ITALY, FAO, SER, IUCN, 106 P.

The United Nations Decade on Ecosystem Restoration 2021–2030 (hereafter “UN Decade”) aims to prevent, halt and reverse ecosystem degradation and recover biodiversity, and ecosystem integrity; enhance human health and well-being, including sustainable delivery of ecosystem goods and services; and mitigate climate change. To create a shared vision of ecosystem restoration, UN Decade partners, through a consultative process, launched ten principles for achieving the highest level of recovery possible through restoration projects. To facilitate application of these principles and thereby maximize restoration outcomes for nature and people, the Standards of practice to guide ecosystem restoration provide key recommendations for all phases of restoration projects. These recommendations are applicable to the broad array of restorative activities included as ecosystem restoration under the UN Decade, across all types of ecosystems (urban, production, cultural, semi-natural and natural) and restoration projects, from voluntary community member-led efforts to highly resourced, nationally funded projects.

To download: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cc9106en>



## A guide to multiple-use forest management planning for small and medium forest enterprises



VAN HENBERGEN H., SHONO K., CEDERGREN J., 2023.

## A guide to multiple-use forest management planning for small and medium forest enterprises

ITALY, FAO, 144 P.

This publication discusses the concept, evolution, and requirements of forest management planning, focusing on multiple-use forest management and small and medium forest enterprises (SMFEs). Forest management planning is a document that translates forest policies into a coordinated programme for managing forests over a set period of time, integrating environmental, economic, and social dimensions. It serves various purposes, such as legal documents, concession agreements, and tools for sustainable forest management. Multiple-use forest management recognizes the diverse values and benefits that forests provide beyond timber, such as water regulation, climate change mitigation, biodiversity conservation, and cultural values.

Despite its challenges, forest management planning can contribute to sustainability and optimize the value derived from forests. SMFEs play a crucial role in supporting livelihoods and forest-based economies. However, barriers such as policy environments, lack of support tools, and management challenges need to be addressed. Forest management planning can help overcome these barriers by ensuring legal compliance, mitigating risks, promoting sustainability, and supporting marketing and value chain development. It is also a valuable tool for empowering local forest users, involving stakeholders, and negotiating benefit-sharing arrangements.

The process of forest management planning involves gathering information, defining objectives, developing silvicultural and ecosystem services plans, creating a business plan, planning for unusual events, and establishing a monitoring system. It is an adaptive learning process that continuously evaluates and adapts plans based on the results of forest management activities. Stakeholder engagement is key to developing a socially acceptable forest management plan, starting with identifying stakeholders, creating awareness, informed discussions, and monitoring to keep stakeholders accountable for their agreed responsibilities. Negotiating expectations and building consensus helps identify conflicts and integrate qualitative data to improve decision-making in multiple-use forest management.

In conclusion, forest management planning is essential for sustainable forest management, contributing to the well-being of communities, the environment, and the economy. This guide provides a framework for forest management planning, guiding forest managers through the planning process stepwise and providing advice on information sources needed during the planning process. The framework can be adapted to national and local contexts in line with relevant regulatory requirements.

To download: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cc6780en>

# ATBC 2024

60<sup>th</sup> Annual Meeting of The Association  
for Tropical Biology and Conservation

Achieving Inclusive Science for Effective  
Conservation, Adaptation, and Resilience  
in the Tropics

July 14<sup>th</sup>-18<sup>th</sup>, 2024, Kigali, Rwanda



## ASSOCIATION FOR TROPICAL BIOLOGY AND CONSERVATION

THE CALL FOR ABSTRACTS (ORAL AND POSTER CONTRIBUTIONS) IS NOW OPEN  
EARLY BIRD REGISTRATION IS NOW OPEN

The Association for Tropical Biology and Conservation (ATBC) has the pleasure of extending a warm welcome to all delegates and participants to be part of the **60<sup>th</sup> Annual Meeting**. Save the dates for this unique event taking place in **Kigali, Rwanda from July 14-18, 2024**.

Join all participants in shaping the future of tropical biology and conservation, focusing on our theme: "Achieving Inclusive Science for Effective Conservation, Adaptation, and Resilience in the Tropics". Stay tuned for the official website launch, where you'll find details about the call for sessions (i.e., symposia, workshops, short courses and more) and general information. Immerse yourself in Kigali's vibrant culture, experience Rwandan hospitality, and explore some of the most breathtaking natural protected areas in the region.



To follow information: <https://www.atbc2024.org/>



# Réseau Cosmétopée ultramarine

Biodiversité, arbres et autres plantes

## Atelier Cosmétopée ultramarine 2024 à La Réunion

**30 et 31 mai 2024 au Pôle de Protection des Plantes (Cirad) à Saint-Pierre – La Réunion, France.**

L'atelier est à destination des professionnels et des étudiants souhaitant découvrir les projets de recherche menés, les innovations déployées et les initiatives montées dans le domaine de la Cosmétopée ultramarine.

Le réseau « Cosmétopée ultramarine : biodiversité, arbres et autres plantes » vise à valoriser les connaissances liées aux plantes et à leurs usages traditionnels destinés à des fins cosmétiques et à favoriser les échanges entre les territoires d'Outre-mer français.

Il a pour ambition de mutualiser les actions et mettre en réseau les acteurs pour soutenir le développement de filières cosmétiques dans les territoires d'Outre-mer.

Le réseau rassemble à la fois des acteurs socio-économiques, institutionnels, de l'enseignement, du monde de la recherche et de l'innovation, soucieux de valoriser et préserver la biodiversité exceptionnelle des territoires ultramarins.

### Information et inscription :

<https://cosmetopee.cirad.fr/>

### Appel à publications Revue Bois et Forêt des Tropiques

Bois &  
forêts  
des  
tropiques

A l'occasion de l'atelier organisé par le réseau Cosmétopée, Bois et Forêts des Tropiques organise un numéro spécial consacré à la Cosmétopée en territoire insulaire ou ultramarin : Biodiversité, arbres et autres plantes.

Les participants scientifiques (conférenciers, chercheurs, doctorants, auteurs de vidéos...) auront la possibilité de **soumettre un manuscrit présentant des résultats de recherche sous la forme d'article scientifiques** (article scientifique standard, article de synthèse, article d'opinion, note de recherche, note technique, résumé de thèse, descriptif technique) complet pour un **numéro spécial de la revue Bois et Forêts des Tropiques**, mettant ainsi en valeur les contributions scientifiques notables présentées lors de l'atelier ou en lien avec les thématiques de la Cosmétopée en territoire insulaire ou ultramarin : Biodiversité, arbres et autres plantes.

Les manuscrits sont à soumettre en français ou en anglais jusqu'au **25 septembre 2024**.

Nous invitons les auteurs intéressés à contacter le comité scientifique à l'adresse suivante : [cosmetopee@cirad.fr](mailto:cosmetopee@cirad.fr) ou [bft@cirad.fr](mailto:bft@cirad.fr)

Comme toute publication scientifique issue de travaux de recherche, les auteurs doivent garantir que leur travail est original et soumis pour première publication.

### Information sur la revue et la soumission de manuscrit :

<https://revues.cirad.fr/index.php/BFT>

