

# LA SITUATION DES FORÊTS DU MONDE

(SOFO) 2022, FAO, 180 P.

**Des solutions forestières pour une relance verte et des économies inclusives, résilientes et durables**



L'édition 2022 de La Situation des forêts du monde explore le potentiel offert par trois solutions forestières dans la perspective d'une relance verte et de la lutte contre des crises planétaires multidimensionnelles, parmi lesquelles le changement climatique et la perte de biodiversité. Elle s'inscrit dans la suite de la Déclaration des dirigeants sur les forêts et l'utilisation des terres (Déclaration de Glasgow), par laquelle 140 pays se sont engagés à stopper le recul des forêts d'ici à 2030 et à apporter un appui à la restauration et à la gestion durable des forêts.

Les trois solutions forestières, qui sont liées entre elles, consistent à mettre un terme à la déforestation et préserver les forêts; à restaurer les terres dégradées et développer l'agroforesterie; et à assurer une utilisation durable des forêts et créer des chaînes de valeur vertes. La mise en pratique, simultanée et équilibrée, de ces trois solutions peut permettre, dans des conditions de durabilité, de produire des avantages économiques et sociaux pour les pays et leurs communautés rurales, de répondre à une demande mondiale en matières premières qui va croissant et de relever les défis environnementaux.

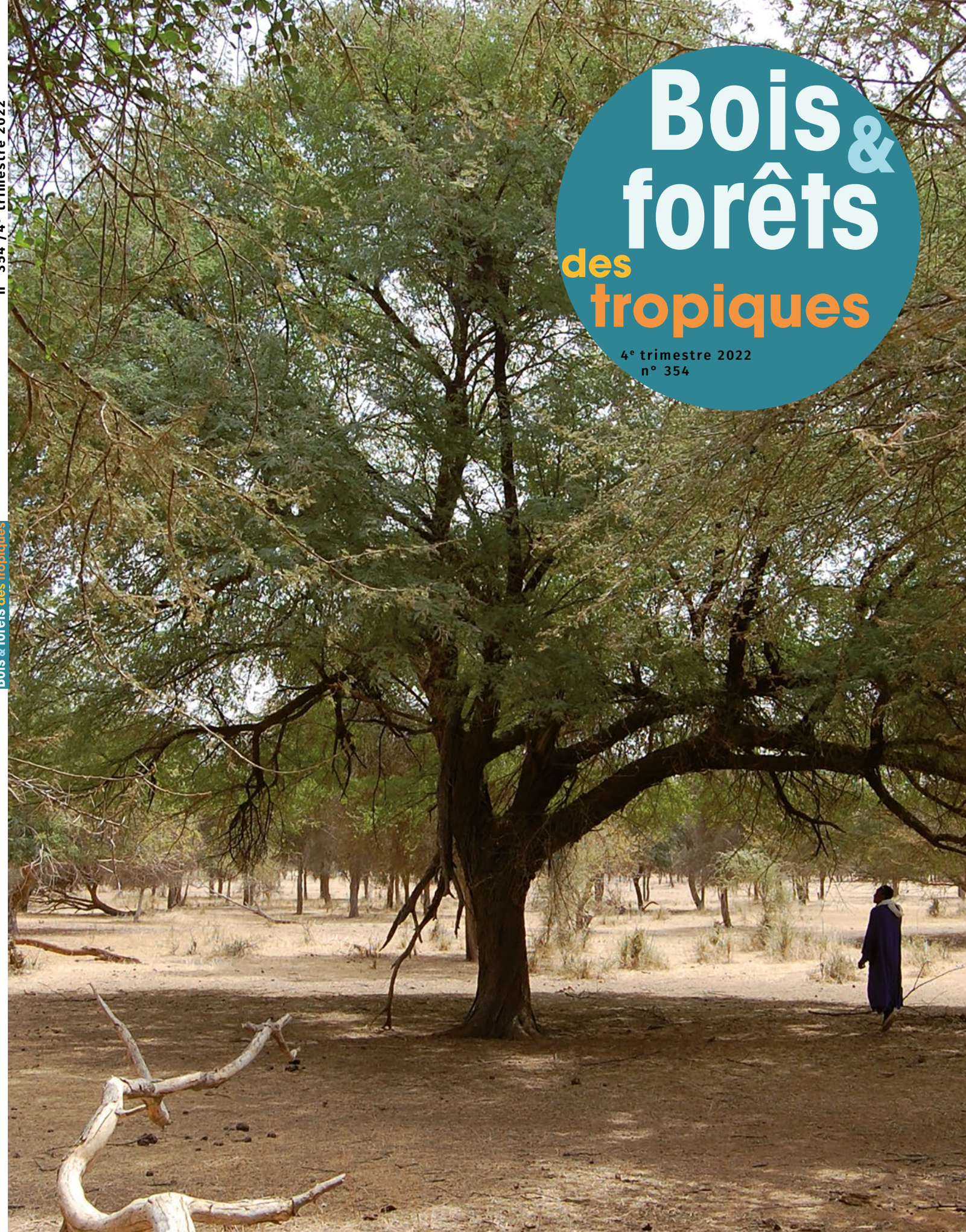
L'édition 2022 réunit un ensemble de données qui démontrent la faisabilité et l'intérêt des solutions forestières et elle énonce les mesures qui pourraient être prises initialement pour avancer sur la voie de leur réalisation. Il n'y a pas de temps à perdre – il faut agir aujourd'hui pour maintenir le réchauffement climatique en deçà de 1,5 °C, réduire le risque que de nouvelles épidémies surviennent, assurer à tous la sécurité alimentaire et la nutrition, éliminer la pauvreté, préserver la biodiversité de la planète et donner à la jeunesse l'espoir d'un monde meilleur et d'un avenir meilleur pour tous.

Pour télécharger l'ouvrage :  
<https://www.fao.org/documents/card/fr/c/cb9360fr>

ISBN: 978-2-87614-791-1 (PDF)  
ISBN: 978-2-87614-790-4 (relié)

Bois & forêts des tropiques

n° 354 / 4<sup>e</sup> trimestre 2022





Revue éditée par le Cirad  
n° 354 / 4<sup>e</sup> trimestre 2022

#### Rédacteur en chef

Jean-François Trébuchon

#### Rédacteurs scientifiques

Kévin Candelier

Vincent Freycon

Antoine Galiana

Valéry Gond

Jean Gérard

Romain Lehnebich

Jacques Tassin

#### Coordination éditoriale

Jean-François Trébuchon

#### Comité éditorial 2020-2022

Seheno Andriantsaralaza (Madagascar)

Samuel Assembe-Mvondo (Cameroun)

Loïc Brancheriau (France)

Stéphanie Carrière (France)

Adeline Fayolle (Belgique)

Isabel Garcia Drigo (Brésil)

Mohamed Tahar Elaieb (Tunisie)

Gerard Nounagnon Gouwakinnou (Bénin)

Isabel Gutierrez-Montes (Costa Rica)

Jean-Michel Harmand (France - Côte d'Ivoire)

Verina Ingram (Cameroun)

Lydie-Stella Koutika (République du Congo)

Anne Larson (Pérou)

Nassima Lassouane (Algérie)

Guillaume Lescuyer (France)

William Mala (Cameroun)

Lucas Jose Mazzei De Freitas (Brésil)

Florence Bobélé Niamke (Côte d'Ivoire)

Symphorien Ongolo (Allemagne)

Johan Oszwald (France)

Amadé Ouédraogo (Burkina Faso)

Ángela Parrado Rosselli (Colombie)

Josoa Randriamalala (Madagascar)

Franck Richard (France)

Cécile Richard-Hansen (France)

Er-Riyahi Saber (Maroc)

Jolien Schure (Suède)

Jose Antonio Sierra-Huelsz (Mexique)

Marie Laure Sougoti-Guissou (Burkina Faso)

Shinya Takeda (Japon)

Marie-France Thévenon-Brillard (France)

Irié Casimir Zo-Bi (Côte d'Ivoire)

#### Graphistes

Pierre-Yves Bled, Jean-Jacques Gonod

#### Correcteur

Jacques Bodichon

#### 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 2021/

#### Reviewers who have contributed to the evaluation of articles in 2021

#### to the evaluation of articles in 2021

Abderrahman Aafi, Fatiha Abdoun, Nadine Amusant, Seheno Andriantsaralaza, Julien Andrieu, Achille Assogbadjo, Wouyo Atakpama, Claudette Bayé-Niwah, Michel Bechtold, Farid Bekdouche, Abdelkader Nabil Benghamen, Salima Benhouhou, Lilain Blanc, Évelyne Bocquet, Manuel Boissière, Frans Bongers, Laurence Boutinot, Loïc Brancheriau, Rafael Calama, Kevin Candelier, Philippe Cattan, Jakub Cerny, Gilles Chaix, Colas Chervier, Daniel Cornelis, Mathieu Coulis, François Courbet, Pascal Danthu, André De Kesel, Victor Deklerck, Denis Depommier, Nathalie Diagne, René Dommain, Jean-Louis Doucet, Chauvelin Douh, Isabelle Droy, Émilien Dubiez, Fulvio Ducci, Simon Dufour, Stéphane Dumarcay, Mohamed Elaieb, Denis Fabre, Adeline Fayolle, Édith Fernandez-Baca, Éric Forni, Vincent Freycon, Antoine Galiana, Isabel Garcia Drigo, João Carlos Garzel Leodoro Silva, Laurent Gazull, Jean Gérard, Nancy Gélinas, Michel Gerken, Valéry Gond, Maya Gonzalez, Mostefa Goubi, Sylvie Gourlet-Fleury, Gérard Nounagnon Gouwakinnou, Michel Grimaldi, Hubert Guérin, Brahim Guit, Jean-Michel Harmand, Jean-Marc Hénin, Dominique Hervé, Didier Hubert, N'dja Justin Kassi, Kouami Kokou, Lydie-Stella Koutika, Clément Lacoste, Nassima Lassouane, Solen Le Clech, Nicolas Le Moigne, Guillaume Lescuyer, Joseph Levillain, Florent Lombard, Jean Joël Loumeto, Dominique Louppe, Bernard Mallet, Rémy Marchal, Éric Marcon, Baptiste Marquant, Jean-François Mas, Mohamed Djamel Miara, Olivier Monteuis, Said Moukrim, Roldan Muradian, Bouzid Nedjimi, Bobélé Niamké, Éric Nicolini, Jean Paul Obame Engone, Johan Oszwald, Amadé Ouédraogo, Sibiri Jean Ouédraogo, Ouhammou Ouhammou, Angela Parrado-Rosselli, Adrien Péroches, Noémie Pousse, Antaryami Pradhan, Javier Puntieri, Khellaf Rahbi, S. M. Rajendran, Jacques Ranger, Dimitrios Raptis, Julian Rode, Patrick Rousset, Er-Riyahi Saber, Peter Saenger, Moukrim Said, Maïsa Santos Joaquim, Mohamed Sarmoum, Julien Schure, Jose Antonio Sierra-Huelsz, Marijenka Tabaković, Jacques Tassin, Simon Taugourdeau, Bernard Thibaut, Fanta Tietiambou, Toma Tonchev, Issam Touhami, Bernard Toutain, Pius Tshimankinda Mpiana, Alain Tsobeng, Jean-François Trébuchon, Brij M. Upreti, Ivaylo Velichkov, Cédric Vermeulen, Matthieu Vignal, Guillaume Viscardi, D. Andrew Wardell, Olga Yongo, Chonglu Zhong, Irié Casimir Zo-Bi.

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

## revues.cirad.fr

© Bois et forêts des tropiques © Cirad

ISSN 0006-579X

ISBN: 978-2-87614-791-1 (PDF)

ISBN: 978-2-87614-790-4 (relié)

Dépôt légal : décembre 2022

283997X - Imprimé en Belgique par CIACO SC,

rue de Rodeuhaie, 27, 1348 Louvain-la-Neuve

Belgique

Maquette : P.-Y. Bled, Curvalle, France

Numéro d'inscription à la CPPP : 59465

Directrice gérante : É. Claverie de Saint Martin

#### Impression du numéro à la demande

consulter [le site web](#) i6doc : 80 €/exemplaire

**Version papier** abonnement annuel de 4 numéros :

France : **240 €/an ttc**

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

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

**Abonnements et commandes de numéros**

Cirad - Bois et forêts des tropiques

Campus international de Baillarguet

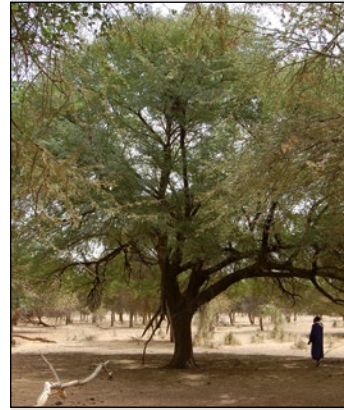
TA C-DIR/B

34398 Montpellier Cedex 5, France

Tél. : +33 4 67 59 37 81

Télécopie : +33 4 67 59 37 55

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



Un spécimen de *Vachellia nilotica* (L.) P.J.H.Hurter & Mabb dans un creux. Dans le système sylvo-pastoral du Ferlo (Sénégal), les grands arbres fournissent de l'ombre et du fourrage en contribuant à la régulation des cycles de l'eau et du carbone.  
*A specimen of Vachellia nilotica (L.) P.J.H.Hurter & Mabb in a hollow. In the silvo-pastoral system of the Ferlo (Senegal), large trees provide shade and fodder and help to regulate the water and carbon cycles.*  
Photo C. Vincke (February 2019).



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 d'un comité éditorial. Après acceptation, des corrections ou modifications sont proposées aux auteurs. Les opinions émises par les auteurs n'engagent pas la responsabilité de la rédaction.



#### Politique d'Accès Libre Open Access policy

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



#### La licence utilisée est

Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

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

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

P. K. Ramachandran Nair  
B. Mohan Kumar  
Vimala D. Nair

# An Introduction to Agroforestry

Four Decades of Scientific Developments

Second Edition



Ramachandran Nair P. K., Mohan Kumar B., Nair D. Vimala, 2021.

## An Introduction to Agroforestry – Four Decades of Scientific Developments – Second edition

USA, Springer, 666 p.

Agroforestry – the practice of growing trees and crops in interacting combinations – is recognized the world over as an integrated approach to sustainable land-use. Agroforestry systems, being multifunctional, facilitate not only the production of food and wood products but also provide a variety of ecosystem services such as climate-change mitigation, biodiversity conservation, and soil quality improvement.

Agroforestry research has made rapid strides since organized efforts started in the late 1970s. Today, a vast body of scientific knowledge and an impressive array of publications on agroforestry are available. Four World Congresses on Agroforestry conducted once every five years since 2004 have brought together the global community of agroforestry professionals and practitioners to share and discuss the emerging trends and paradigm shifts in this field. The fifth Congress is scheduled to be held in Québec, Canada.

However, a comprehensive college-level textbook incorporating these research findings did not exist until this book was first published. The first edition of this book in 1993 (Nair, P. K. R., 1993) is out of print and somewhat dated. This revised edition, with emphasis on the scientific developments during the past more than four decades, addresses this long-felt need.

Springer Nature Switzerland AG. Part of Springer Nature.

<https://doi.org/10.1007/978-3-030-75358-0>

## ÉDITORIAL

- Bois et Forêts des Tropiques, une revue pour la promotion des sciences forestières appliquées et les partenariats Sud-Nord et Sud-Sud** 3  
 K. CANDELIER, J.-F. TRÉBUCHON, C. VAUTRIN

## ARTICLES DE RECHERCHE

- Effets du stress hydrique sur la physiologie et la morphologie de plants du robinier, *Robinia pseudoacacia*, d'Algérie** 7  
 M. TOUMI, S. BARRIS, S. BERKA, F. AID
- Ajustement d'un système d'équations de volumes marchands pour le chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd.) en Tunisie** 19  
 T. SGHAIER, Y. AMMARI
- Variation de la morphologie des unités de croissance des essences *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. (Meliaceae) et *Pterocarpus erinaceus* Poir. (Fabaceae) selon l'habitat et le climat** 41  
 B. I. ADJI, D. S. AKAFFOU, S. SABATIER
- Analyse des options réelles appliquée aux projets d'investissement dans les forêts plantées à *Pinus*** 55  
 D. SIMÕES, Q. SOARES ROCHA, R. ALMEIDA MUNIS, R. BARBOSA GOMES DA SILVA, G. CAPRIOLI GARCIA
- Sécurité des hêvéas en plantations face au vent : analyse méthodologique d'expériences de flexion sur des arbres sur pied inclinés** 65  
 A. C. ENGONGA EDZANG, B. NIEZ, L. HEIM, T. FOURCAUD, J. GRIL, B. MOULIA, É. BADEL

## RÉSUMÉ DE THÈSE

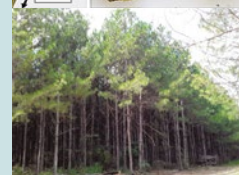
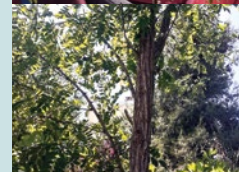
- Cinquante ans de dynamique de la végétation ligneuse dans le Sahel sénégalais (Ferlo) : bases pour une approche de la diversité fonctionnelle** 79  
 M. DENDONCKER

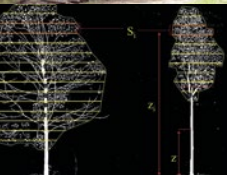
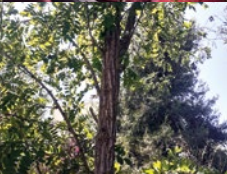
## VOS LECTURES

- Ramachandran Nair P. K., Mohan Kumar B., Nair D. Vimala, 2021. **An Introduction to Agroforestry – Four Decades of Scientific Developments – Second edition.** 81
- La Situation des forêts du monde (SOFO). 2022.** 82

## CONFÉRENCES INTERNATIONALES

- IRG54 - Session spéciale et numéro spécial sur les bois tropicaux : Chimie de la durabilité naturelle et conférée.** 40
- 59<sup>ème</sup> Rencontre annuelle de l'association pour la biologie et la conservation tropicale (ATBC) 2-6 juillet 2023 | Coimbatore, Inde.** 78





## EDITORIAL

- Bois et Forêts des Tropiques (Tropical & Mediterranean Woods & Forests)** 3  
a journal for the promotion of applied forest sciences  
and South-North and South-South partnerships  
K. CANDELIER, J.-F. TRÉBUCHON, C. VAUTRIN

## RESEARCH PAPER

- Effects of water stress on the physiology and morphology** 7  
**of black locust trees, *Robinia pseudoacacia*, in Algeria**  
M. TOUMI, S. BARRIS, S. BERKA, F. AID
- Adjusting a system of marketable volume equations** 19  
**for *Quercus canariensis* Willd. in Tunisia**  
T. SGHAIER, Y. AMMARI
- Variation in growth unit morphology in *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. (Meliaceae)** 41  
**and *Pterocarpus erinaceus* Poir. (Fabaceae) according to habitat and climate**  
B. I. ADJI, D. S. AKAFFOU, S. SABATIER
- Real options analysis applied to investment projects in planted forests of *Pinus*** 55  
D. SIMÕES, Q. SOARES ROCHA, R. ALMEIDA MUNIS,  
R. BARBOSA GOMES DA SILVA, G. CAPRIOLI GARCIA
- Wind safety of rubber trees in plantations: methodological analysis** 65  
**of bending experiments on inclined standing trees**  
A. C. ENGONGA EDZANG, B. NIEZ, L. HEIM, T. FOURCAUD, J. GRIL, B. MOULIA, É. BADEL

## PHILOSOPHIÆ DOCTOR ABSTRACT

- 50 years of woody vegetation dynamics in the Senegalese Sahel (Ferlo):** 79  
**foundations for a functional diversity approach**  
M. DENDONCKER

## BOOK REVIEW

- Ramachandran Nair P. K., Mohan Kumar B., Nair D. Vimala, 2021. An Introduction** 18  
**to Agroforestry – Four Decades of Scientific Developments – Second edition.** 81
- The State of the World's Forests (SOFO) 2022.** 82

## INTERNATIONAL CONFERENCES

- IRG54 - Special session and special issue on Tropical woods:** 40  
**Natural and conferred durability chemistry.**
- 59<sup>th</sup> Annual Meeting of the Association for Tropical Biology and Conservation** 78  
July 2<sup>nd</sup>-6<sup>th</sup>, 2023 | Coimbatore, India.

## Bois et Forêts des Tropiques une revue pour la promotion des sciences forestières appliquées et les partenariats Sud-Nord et Sud-Sud

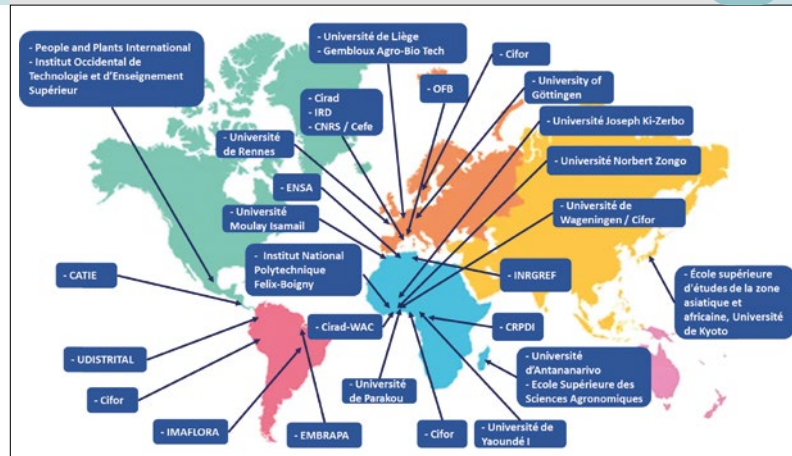
La revue *Bois et Forêts des Tropiques* est éditée en continu depuis 1947 par le CTFT (Centre technique forestier tropical) puis par le Cirad (l'organisme français de recherche agronomique et de coopération internationale pour le développement durable des régions tropicales et méditerranéennes), en France. Cette revue publie des articles originaux de recherche appliquée ancrée territorialement ainsi que des documents techniques sur les sciences de la foresterie et les bois en régions chaudes. Des résumés de thèse de doctorat, des descriptifs techniques et des rapports de séminaires sont occasionnellement publiés. Tous les articles sont soumis à l'examen d'au moins deux membres du comité de rédaction afin d'estimer les potentiels rédactionnels et éditoriaux ainsi que le fond scientifique, et ensuite à une évaluation selon un système en double aveugle menée par des examinateurs externes, intervenant bénévolement et suivant leurs disponibilités et domaines d'expertise.

Un comité éditorial, renouvelé tous les trois ans et qui rassemble une trentaine de chercheurs du Nord et du Sud pour la période 2020-2022 (figure 1), selon une parité du genre et un équilibre Nord-Sud et générationnel, veille à la qualité du contenu de la revue, en lien avec les évolutions thématiques des recherches sur l'environnement de la forêt, de l'arbre et du bois. Une attention particulière à la faible représentation des régions de l'Asie et de l'Océanie (figure 1) au sein de ce comité éditorial sera portée lors du prochain renouvellement de l'équipe en 2023.

Ce processus d'évaluation nécessite du temps, mais constitue un outil incontournable permettant de s'assurer de la qualité scientifique et de l'impact des articles publiés dans la revue. La durée du traitement d'un article, entre la soumission du manuscrit par les auteurs et l'acceptation définitive pour publication, est de 6 mois en moyenne. À cela s'ajoute le temps d'édition pour publier l'article qui est de l'ordre de 4 mois (figure 2). La durée de chacune de ces étapes est relativement stable sur les cinq dernières années (figure 2B). La compression de ces délais est assujettie à la qualité des travaux présentés, à l'aspect novateur des contenus et à la réactivité des différents acteurs intervenant dans le processus éditorial (auteurs, relecteurs, rédacteurs scientifiques, rédacteur en chef, équipe d'édition).

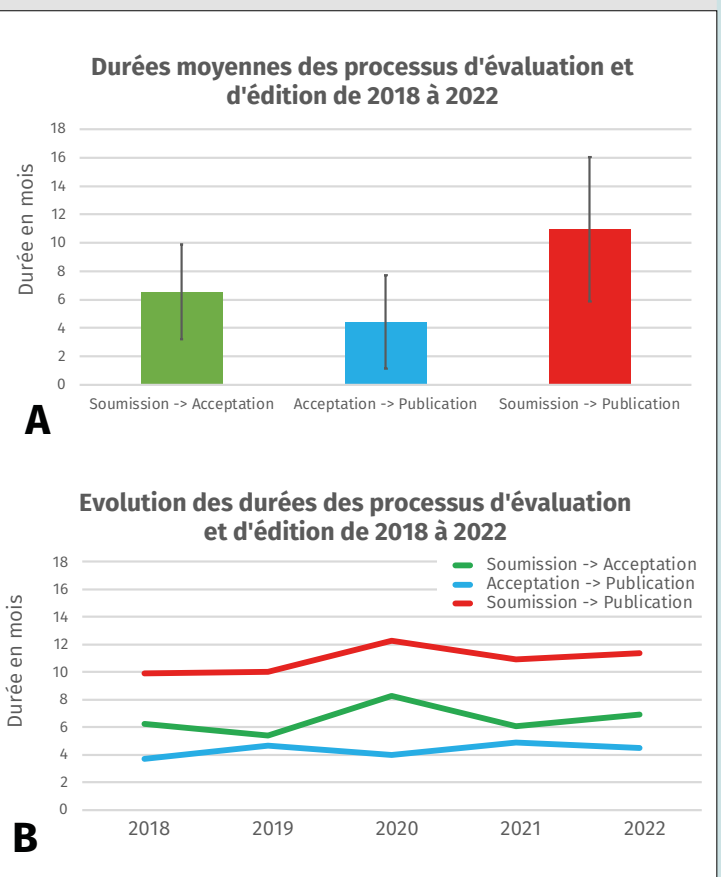
### Des thématiques multiples sur des sujets d'actualité

À l'interface entre la recherche et le développement, la revue est entièrement consacrée aux sciences et techniques de la filière Forêts-Bois en régions chaudes, foresterie au sens large (gestion multifonctionnelle des espaces ruraux et forestiers, et approches environnementales



**Figure 1.** Distribution cartographique des établissements contribuant à la revue *Bois et Forêts des Tropiques* par l'intermédiaire des membres du dernier comité éditorial de 2020 à 2022 (Trébuchon, 2020).

*Map distribution of institutions contributing to the journal Bois et Forêts des Tropiques through the members of the last editorial board from 2020 to 2022 (Trébuchon, 2020).*

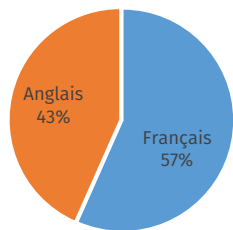


**Figure 2.** Durées moyennes et écarts-types (A) et évolution des délais (B) de traitement des manuscrits acceptés pour publication dans *Bois et Forêts des Tropiques* de 2018 à 2022. *Average times and standard deviations (A) and changes in processing times (B) for manuscripts accepted for publication in Bois et Forêts des Tropiques from 2018 to 2022.*

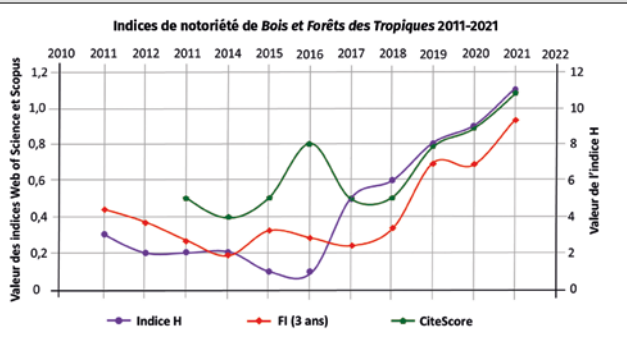


**Figure 3.** Représentation visuelle des mots-clés les plus cités dans les articles publiés dans *Bois et Forêts des Tropiques* sur la période 2018-2022. La taille des caractères reflète le nombre de fois où le mot-clé est cité dans les articles publiés.  
*Visual representation of the most cited keywords in articles published in Bois et Forêts des Tropiques over the period 2018-2022. The font size reflects the number of times the keyword is cited in the published articles.*

**Langues de rédaction des manuscrits de 2018 à 2022**



**Figure 4.** Répartition de la langue de rédaction (français ou anglais) des articles publiés dans *Bois et Forêts des Tropiques* sur la période 2018-2022.  
*Language distribution (French or English) of articles published in Bois et Forêts des Tropiques over the period 2018-2022.*



**Figure 5.** Évolution des indices de notoriété de *Bois et Forêts des Tropiques* de 2011 à 2021. Indice H : niveau de citation des publications appliqué à la revue scientifique. FI : facteur d'impact - 3 ans, nombre moyen de citations de chaque article publié dans la revue, calculé avec les articles des deux années précédentes. CiteScore : citations reçues les trois dernières années pour des articles, des revues, des documents de conférence, des chapitres de livre et des documents de données publiés les trois dernières années, divisé par le nombre de publications publiées sur cette période.  
*Changes in the awareness indices of Bois et Forêts des Tropiques from 2011 to 2021. Index H: citation level of publications applied to the scientific journal. IF: Impact Factor - 3 years, average number of citations of each article published in the journal, calculated with the articles of the previous two years. CiteScore: citations received in the last three years for articles, journals, conference papers, book chapters and data papers published in the last three years, divided by the number of publications published in that period.*

qui en découlent), incluant les sciences et technologies du bois et de ses matériaux dérivés. La représentation visuelle de l'analyse des mots-clés les plus cités dans les articles publiés sur la période 2018-2022 (figure 3, Photo 1) reflète fidèlement le panorama des thématiques et des sites géographiques les plus traités dans *Bois et Forêts des Tropiques* durant la période écoulée.

**Un soutien pour les pays du Sud, un modèle éditorial « Diamant », et une notoriété en constante augmentation**

Tous les articles publiés sont entièrement et immédiatement accessibles aux lecteurs et utilisateurs du monde entier, sans embargo, sous les formats de fichier PDF (*Portable Document Format*), ainsi que le préconise le modèle éditorial Diamant, gratuit pour les lecteurs et les auteurs. Les auteurs sont libres d'archiver et de diffuser leurs articles comme ils le souhaitent, en conservant tous les droits (licence CC-BY). La revue reste gratuite, en accès libre et soutenue financièrement par le Cirad. Conformément au mandat de partenariat porté par cet organisme de recherche, la revue est au service de la publication de travaux de recherche appliquée dans le domaine des sciences forestières, en soutien et en coopération avec la recherche au Sud. Publiée en français ou en anglais (et en espagnol pour des articles anciens), la revue a choisi d'accompagner les jeunes chercheurs et les chercheurs ou enseignants-chercheurs expérimentés œuvrant dans l'univers de la recherche forestière appliquée. Ces cinq dernières années (2018-2022), un peu moins de la moitié (43 %) des articles publiés ont été rédigés en anglais (figure 4). La part des manuscrits rédigés en anglais fluctue chaque année, mais reste comprise entre 38 % en 2018 et 50 % en 2022 (figure 4B). Dans la continuité de cette démarche bilingue, *Bois et Forêts des Tropiques* assure les traductions des titres, des résumés et des légendes des figures de chaque article (français, anglais et espagnol pour les résumés ; français et anglais pour les titres et légendes des figures).

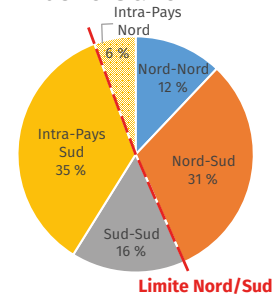
Ce modèle éditorial permet aujourd'hui à la revue de maintenir un large impact des articles publiés. Cela reste un des engagements du comité de rédaction au cours de ces dernières années et restera la motivation centrale de l'équipe éditoriale dans la vie future de *Bois et Forêts des Tropiques*. Cette identification par le lectorat s'illustre par l'évolution constante des indices de notoriété des bases de données internationales attribués à la revue, qui étaient pour l'année 2021 à la valeur de 11 pour l'indice H (6 en 2018), 1,1 pour l'indice CiteScore (0,5 en 2018) et 0,94 pour le facteur d'impact (FI-3 ans Web of Science) (0,35 en 2018) (figure 5).

Aujourd'hui, la revue est également répertoriée dans les catégories « CiteScore », « Écologie » (Q3, quartile 3), « Écologie, évolution, comportement et systématique » (Q3, quartile 3), « Foresterie » (Q3, quartile 3).

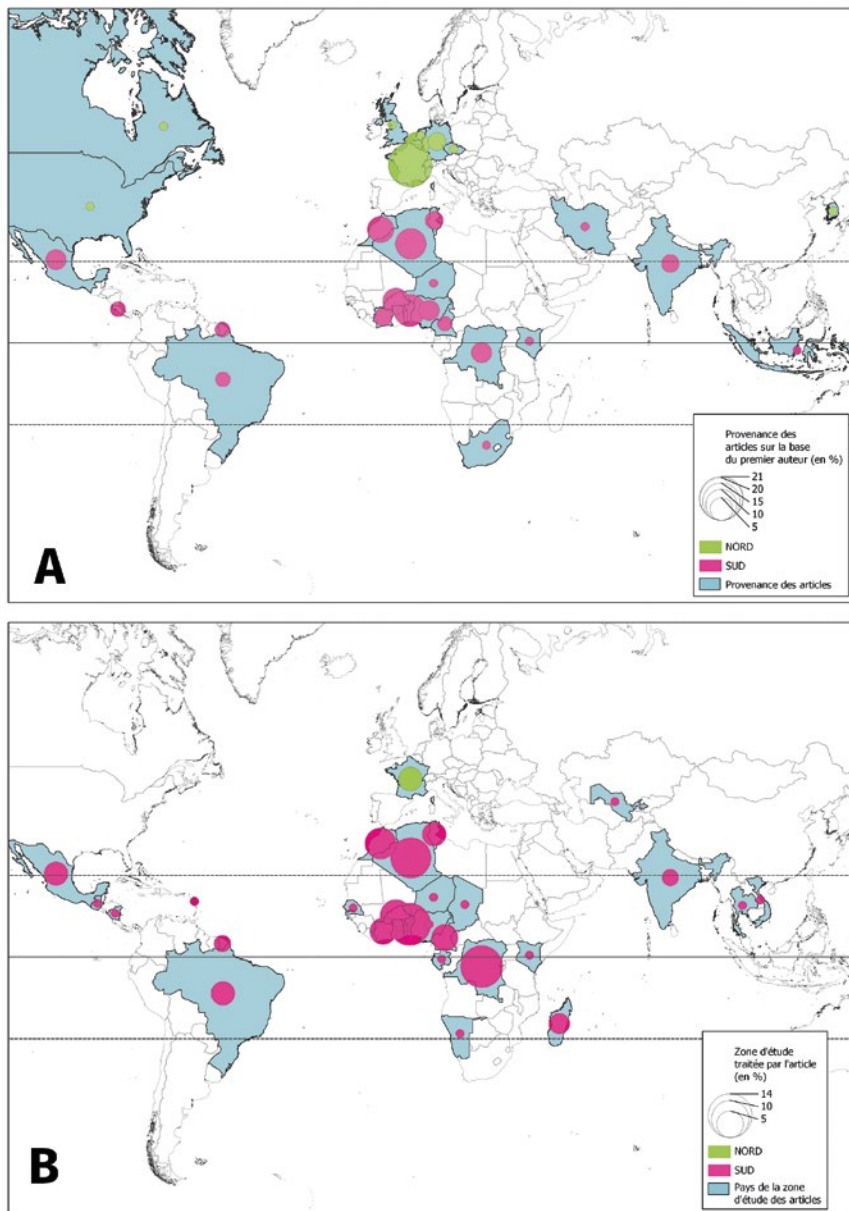
### Des sciences forestières en partenariat avec et vers les pays du Sud

La revue *Bois et Forêts des Tropiques* porte à la connaissance des résultats de recherche appliquée sur les forêts des régions intertropicales et méditerranéennes, dans plus de soixante pays, privilégiant une recherche coopérative appliquée associant le Sud et le Nord. Toutefois, la réalité est plus nuancée et illustre un changement de paradigme. Les articles publiés au cours de ces cinq dernières années reflètent bien l'esprit de partenariat entre les pays et entre les instituts, avec en première portion un ensemble Nord-Sud (31 %) et Sud-Sud (16 %) menant des projets de recherche et de développement conjoints (figure 6 et figure 7A), conduits dans des zones intertropicales et méditerranéennes (figure 7B).

### Types de Partenariats de 2018 à 2022



**Figure 6.** Répartition des différents types de partenariats entre pays du Sud et du Nord ayant abouti à des articles publiés dans *Bois et Forêts des Tropiques* sur la période 2018-2022.  
*Distribution of the different types of partnerships between Southern and Northern countries that resulted in articles published in Bois et Forêts des Tropiques over the period 2018-2022.*



**Figure 7.** Distribution géographique de l'origine des auteurs correspondants (A) et des zones d'étude (B) des articles publiés dans *Bois et Forêts des Tropiques* sur la période 2018-2022.  
*Geographical distribution of the origin of corresponding authors (A) and study areas (B) of articles published in Bois et Forêts des Tropiques over the period 2018-2022.*

La deuxième portion des articles publiés concerne les études menées par un seul pays du Sud (35 %) avec des partenariats entre les instituts nationaux. Une troisième portion concerne l'ensemble des articles publiés issus de partenariats Nord-Nord et intra-Pays Nord, dans lesquels les terrains d'étude concernés sont situés en zones tropicale ou méditerranéenne (figure 7B). La part des partenariats impliquant uniquement des pays du Sud représente la moitié des travaux publiés dans *Bois et Forêts des Tropiques* (partenariats Intra-Pays Sud et Sud-Sud, cf. ligne rouge figure 6). Enfin, la revue est destinée résolument à l'attention des pays du Sud (82 %) en favorisant les partenariats à l'intérieur des pays du Sud, Nord-Sud et Sud-Sud.

### Place du Cirad au sein de la revue et dans les partenariats

Depuis 75 ans, le CTFT, puis le Cirad s'engagent dans une stratégie institutionnelle pour la science ouverte, la valorisation et la libre diffusion des connaissances tout en contribuant à répondre aux enjeux de développement de leurs partenaires dans le monde. Outre l'investissement du comité de rédaction de la revue *Bois et Forêts des Tropiques*, les chercheurs du Cirad s'impliquent dans des projets de recherche et de développement menés en étroits partenariats avec les institutions du Sud. Ils représentent un quart des articles publiés dans la revue au cours de ces cinq dernières années (figure 8). Ce niveau d'implication fluctue autour du seuil de 20 %, année après année. La part des manuscrits émanant uniquement du Cirad avec ou sans l'implication de ses partenaires des pays du Nord ne représente qu'une faible proportion, soit 4 % et 3 %, respectivement. La dernière portion (73 %) représente donc les articles publiés dans lesquels le Cirad n'est pas partenaire et ne joue aucun rôle dans les études correspondantes.

Les chercheurs du Cirad interviennent dans la revue, en appui aux pays et aux institutions du Sud, et non pas pour s'octroyer une niche éditoriale, respectant en cela le mandat de la revue. Leurs contributions se matérialisent également dans l'évaluation en double aveugle des manuscrits en tant que relecteurs, dans l'équipe éditoriale et dans le comité éditorial.

*Bois et Forêts des Tropiques* persiste à appuyer collectivement les pays du Sud en s'épaulant d'instituts de recherche et/ou de développement internationaux, et compte aussi sur leurs engagements pour continuer à faire évoluer et progresser la revue pour le bénéfice du Sud et du Nord.

Kévin CANDELIER<sup>1, 2, 3</sup>,  
Jean-François TRÉBUCHON<sup>4, 5, 6</sup>,  
Clarisse VAUTRIN<sup>5, 6</sup>

<sup>1</sup> Rédacteur scientifique, Cirad, *Bois et Forêts des Tropiques*, France

<sup>2</sup> Cirad, UPR BioWooEB, 34398 Montpellier, France

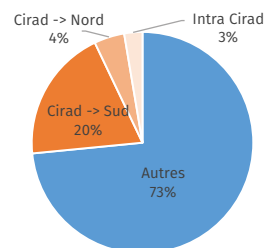
<sup>3</sup> BioWooEB, Univ Montpellier, Cirad, Montpellier, France

<sup>4</sup> Rédacteur en chef et coordinateur éditorial, Cirad, *Bois et Forêts des Tropiques*, France

<sup>5</sup> Cirad, Forêts et Sociétés, 34398 Montpellier

<sup>6</sup> Forêts et Sociétés, Univ Montpellier, Cirad, Montpellier, France

### Place du Cirad dans les partenariats de 2018 à 2022



**Figure 8.**

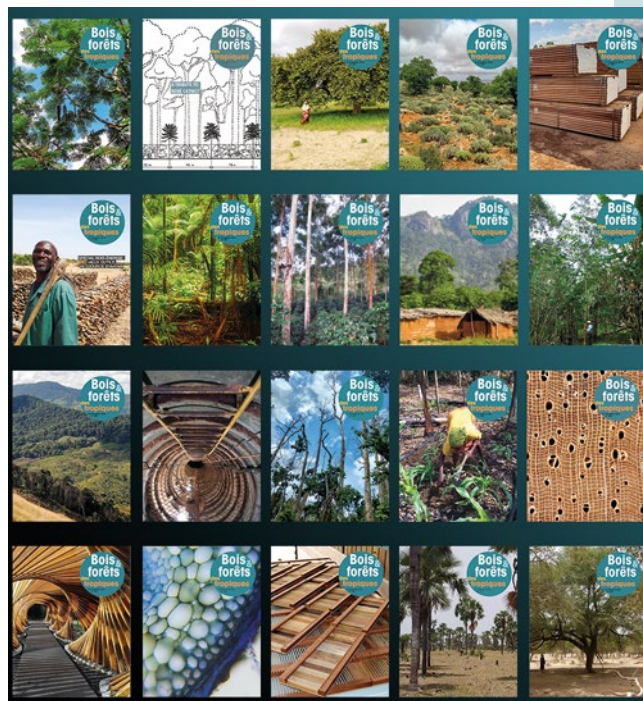
Place du Cirad dans les partenariats liés aux articles publiés dans *Bois et Forêts des Tropiques* sur la période 2018-2022.

CIRAD's place in partnerships related to articles published in *Bois et Forêts des Tropiques* over the period 2018-2022.

### Références

Trébuchon J.-F., 2020. Bois et Forêts des Tropiques évolue en partenariat avec la recherche au Sud. *Bois et Forêts des Tropiques*, 343 : 3-4. <https://doi.org/10.19182/bft2020.343.a31854>

Notre vision est que *Bois et Forêts des Tropiques* contribue au développement d'une communauté de recherche internationale, active et ouverte pour les sciences de la forêt et du bois au cours des prochaines années ! Des informations complémentaires et pratiques sont disponibles sur le nouveau site web de la revue (<https://revues.cirad.fr/index.php/BFT>), ainsi que sur sa page LinkedIn (<https://www.linkedin.com/in/bois-et-for%C3%AAats-des-tropiques-37590a24a/>).



**Photo 1.**

Couvertures des numéros de la revue *Bois et Forêts des Tropiques*, parus de 2018 à 2022, utilisés pour cette analyse statistique.

Covers of the issues of the journal *Bois et Forêts des Tropiques*, published from 2018-2022, used for this statistical analysis.



# Effets du stress hydrique sur la physiologie et la morphologie de plants du robinier, *Robinia pseudoacacia*, d'Algérie

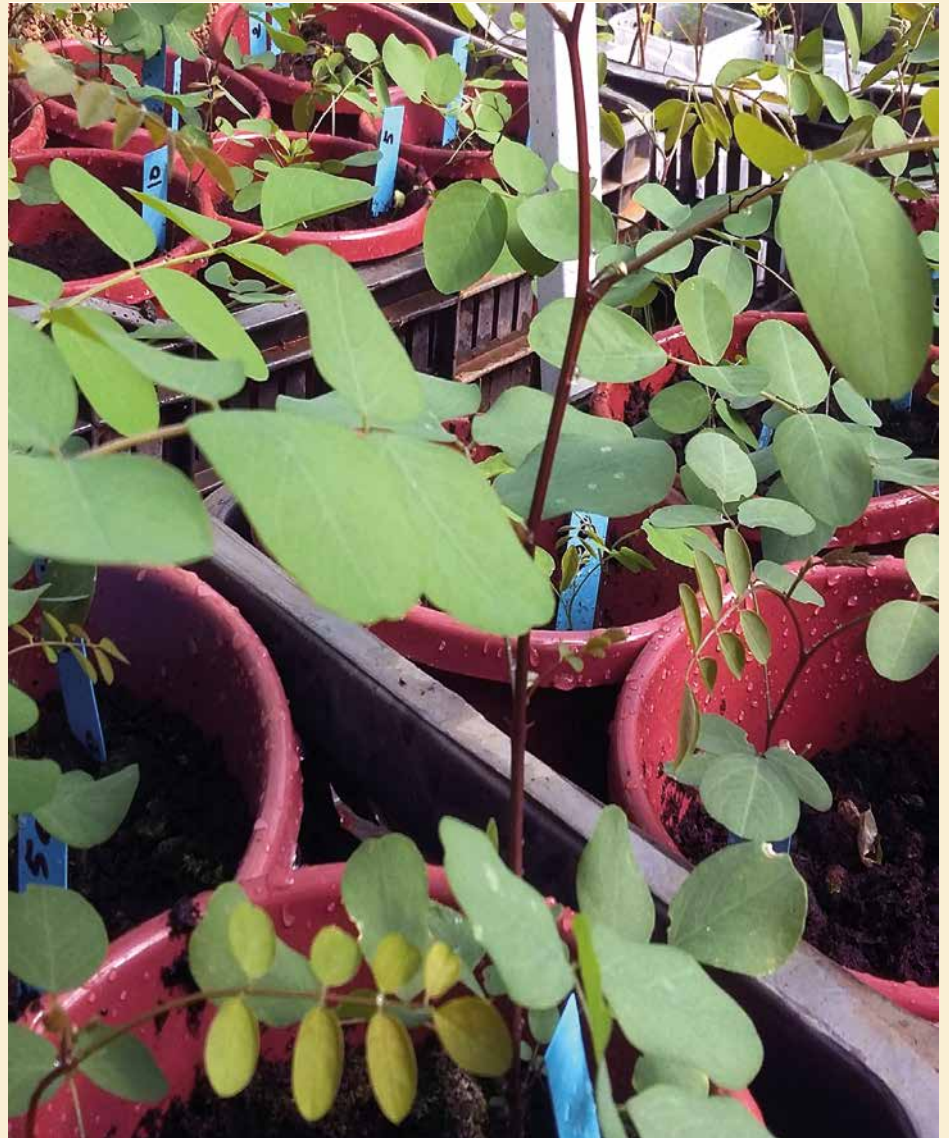
**Mohamed TOUMI**<sup>1,2</sup>  
**Selma BARRIS**<sup>2</sup>  
**Souhila BERKA**<sup>3</sup>  
**Fatiha AID**<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université Alger 1 Benyoucef  
Benkhedda  
2 rue Didouche Mourad  
16006 Alger  
Algérie

<sup>2</sup> Université des sciences  
et de la technologie Houari Boumediene  
Faculté des sciences biologiques  
Laboratoire de biologie et physiologie /  
physiologie végétale  
BP 32, El Alia Bab Ezzouar  
16111 Alger  
Algérie

<sup>3</sup> Institut national de recherche  
forestière  
Arboretum de Baïnem  
BP 37, Chéraga  
16300 Alger  
Algérie

**Auteur correspondant /**  
**Corresponding author:**  
**Mohamed TOUMI** – [t\\_med@hotmail.com](mailto:t_med@hotmail.com)



**Photo 1.**

Jeunes plants de *Robinia pseudoacacia* de 10 semaines au sein de la serre de l'INRF à Alger, en Algérie.  
Young *Robinia pseudoacacia* plants, 10 weeks old, in the INRF greenhouse in Algiers, Algeria.  
Photo M. Toumi.

Doi : 10.19182/bft2022.354.a36854 – Droit d'auteur © 2022, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 21 décembre 2021 ; date d'acceptation : 18 août 2022 ; date de publication : 1er décembre 2022.



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

## Citer l'article / To cite the article

Toumi M., Barris S., Berka S., Aid F., 2022. Effets du stress hydrique sur la physiologie et la morphologie de plants du robinier, *Robinia pseudoacacia*, d'Algérie. Bois et Forêts des Tropiques, 354 : 7-17. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2022.354.a36854>

## RÉSUMÉ

### Effets du stress hydrique sur la physiologie et la morphologie de plants du robinier, *Robinia pseudoacacia*, d'Algérie

L'irrégularité des pluies ainsi que les fortes températures sont des facteurs limitant la croissance des espèces végétales qui vivent dans les zones arides en Algérie, ce qui a pour conséquence une réduction du couvert végétal, favorisant ainsi la désertification. La plantation d'espèces résistantes à la sécheresse présente un avantage certain dans le repeuplement de ces zones et la lutte contre l'érosion des terres. Le robinier, *Robinia pseudoacacia* L., fait partie de la famille des légumineuses fixatrices d'azote, ce qui lui confère une aptitude à coloniser des sols pauvres en minéraux. Grâce à sa multiplication végétative rapide, le robinier permettrait de recoloniser des zones menacées par la sécheresse. L'étude du comportement physiologique des jeunes plants de *R. pseudoacacia* en conditions de stress hydrique est importante afin d'évaluer la résistance de cette espèce, ainsi que sa capacité à vivre dans des zones exposées à de faibles précipitations. Après dix semaines de croissance, un arrêt d'arrosage de quatre semaines est appliqué sur de jeunes plants de *R. pseudoacacia*. Cette contrainte induit une diminution significative de la croissance après deux semaines d'arrêt d'arrosage. Cette réduction s'accompagne d'un arrêt de formation de nouvelles feuilles. La teneur relative en eau des feuilles (TRE) diminue progressivement durant cette même période pour atteindre 78 %, puis chute après quatre semaines d'arrêt d'arrosage. Une diminution significative de la conductance stomatique est observée à partir de la deuxième semaine d'arrêt d'arrosage afin de réduire la quantité d'eau perdue par transpiration stomatique. Une reprise de la croissance ainsi qu'une augmentation de la teneur en eau et de la conductance stomatique des feuilles sont observées chez les plants stressés après une semaine de réarrosage. Le robinier présenterait donc une bonne capacité à reprendre une activité physiologique normale après un arrêt d'arrosage de quatre semaines.

**Mots-clés :** *Robinia pseudoacacia* L., conductance stomatique, teneur relative en eau, résistance, croissance, désertification, Algérie.

## ABSTRACT

### Effects of water stress on the physiology and morphology of black locust trees, *Robinia pseudoacacia*, in Algeria

Irregular rainfall and high temperatures are factors limiting the growth of plant species living in arid zones in Algeria. This results in a reduction of the plant cover, favouring desertification. Planting drought-resistant species is a clear advantage for the restoration of plant cover and the fight against soil erosion in these areas. Black locust trees (*Robinia pseudoacacia* L.) belong to the family of nitrogen-fixing legumes, which makes them suitable for colonising mineral-poor soils. Thanks to its rapid vegetative propagation, this species could re-colonise areas threatened by drought. It is important to study the physiological behaviour of *R. pseudoacacia* seedlings under water stress conditions to assess the drought resistance of the species, as well as its capacity for survival in areas with low rainfall. After ten weeks of growth, watering of the *R. pseudoacacia* seedlings was stopped for four weeks. After two weeks, a significant decrease in growth was observed and the formation of new leaves ceased. The relative water content of the leaves (RWC) decreased steadily during the same period to 78%, then fell abruptly after four weeks without watering. A significant decrease in stomatal conductance was observed from the second week without watering, which reduced the quantity of water lost through stomatal transpiration. When watering resumed, growth recovered and an increase in water content and stomatal conductance of the leaves of the stressed plants was observed after one week. This species thus appears to have a high capacity for resuming normal physiological activity after a four-week interruption of watering.

**Keywords:** *Robinia pseudoacacia* L., stomatal conductance, relative water content, resistance, growth, desertification, Algeria.

M. TOUMI, S. BARRIS, S. BERKA, F. AID

## RESUMEN

### Efectos del estrés hídrico en la fisiología y la morfología de la robinia, *Robinia pseudoacacia*, de Argelia

La irregularidad de las precipitaciones y las altas temperaturas son factores limitadores del crecimiento de las especies vegetales que viven en las zonas áridas de Argelia, lo que se traduce en una reducción de la cubierta vegetal, favoreciendo así la desertificación. La plantación de especies resistentes a la sequía es claramente ventajosa para la repoblación de estas zonas y para combatir la erosión del suelo. La robinia, *Robinia pseudoacacia* L., pertenece a la familia de las leguminosas fijadoras de nitrógeno, lo que la hace adecuada para colonizar suelos pobres en minerales. Gracias a su rápida multiplicación vegetativa, la robinia permitiría recolonizar zonas amenazadas por la sequía. El estudio del comportamiento fisiológico de las plántulas de *R. pseudoacacia* en condiciones de estrés hídrico es importante para evaluar la resistencia de esta especie, así como su capacidad para vivir en zonas expuestas a bajas precipitaciones. Tras diez semanas de crecimiento se interrumpió durante cuatro semanas el riego de las plántulas de *R. pseudoacacia* L. Esta restricción indujo un descenso significativo del crecimiento tras dos semanas de interrupción del riego. La reducción en el crecimiento fue acompañada por una interrupción de la formación de nuevas hojas. El contenido hídrico relativo (CHR) en las hojas disminuyó gradualmente durante el mismo período hasta el 78 % y luego se precipitó después de cuatro semanas sin riego. Se observó una disminución significativa de la conductancia estomática a partir de la segunda semana de parada del riego para reducir la cantidad de agua perdida por transpiración estomática. Se observó una reanudación del crecimiento, así como un aumento del contenido de agua y de la conductancia estomática en las hojas de las plantas estresadas tras una semana de volver a ser regadas. Por lo tanto, se dice que la robinia tiene una buena capacidad para reanudar la actividad fisiológica normal tras una pausa de cuatro semanas en el riego.

**Palabras clave:** *Robinia pseudoacacia* L., conductancia estomática, contenido relativo de agua, resistencia, crecimiento, desertificación, Argelia.

## Introduction

Des changements climatiques particulièrement rapides, pouvant amplifier l'aridité des sols en augmentant la durée des phases sèches, sont actuellement observés dans le monde. Ces perturbations sont dues aux activités humaines qui provoquent une importante accélération de l'effet de serre, conduisant à un réchauffement climatique global et à de fortes perturbations dans le cycle des pluies (Zou *et al.*, 2016 ; Gudmundsson *et al.*, 2019). Ces changements climatiques peuvent avoir un effet néfaste sur les végétaux. En effet, une augmentation de température de 0,5 °C pourrait induire des changements majeurs sur la végétation en région méditerranéenne (Guiot et Cramer, 2016).

Le déficit hydrique résultant de l'irrégularité des pluies constitue un des facteurs limitant la production agricole en zone méditerranéenne (Belkhodja et Bidai, 2004). Le manque d'eau peut entraîner des modifications sur les plans morphologique, anatomique, physiologique, biochimique et moléculaire, qui affectent le rendement et provoquent la mort de la plante si le stress perdure (Wang *et al.*, 2003). Les conséquences du stress hydrique se traduisent essentiellement par une diminution de la croissance, de la surface foliaire (Kramer et Boyer, 1995) et de l'ouverture des stomates ainsi qu'une réduction de l'activité photosynthétique (Kim et van Iersel, 2011).

Une des problématiques environnementales les plus préoccupantes du XXI<sup>e</sup> siècle est l'installation de la sécheresse suite à un déficit hydrique prolongé ainsi qu'à une forte érosion éolienne. La désertification est la conséquence de la dégradation des terres dans les écosystèmes secs (FAO, 1992). En Algérie, près de 500 000 ha de terres en zones steppiques sont en voie de désertification, et plus de 7 millions d'hectares sont directement menacés par ce processus (MATE, 2002 ; Belkhodja et Bidai, 2004). En effet, la superficie des terres dégradées est passée de 5 millions d'hectares en 1985 à 7,5 millions d'hectares en 1995 (Bensouiah, 2003).

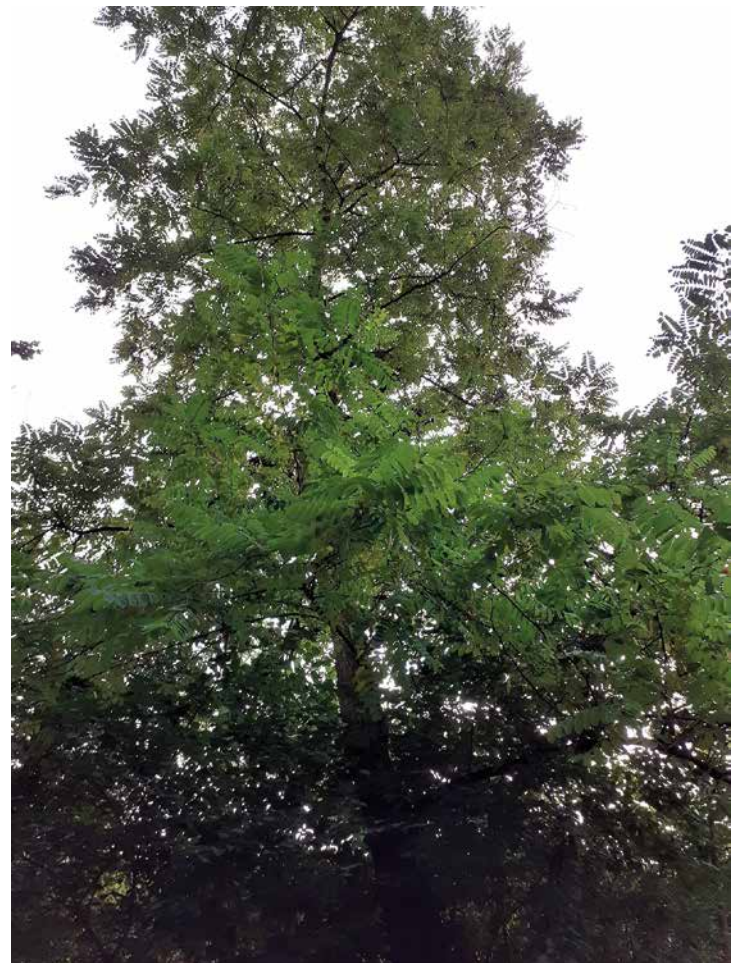
Pour lutter contre la désertification et ses effets néfastes, il serait intéressant de choisir des espèces ligneuses adaptées à ces zones menacées. Cette approche permettra une meilleure lutte contre la désertification en misant sur l'amélioration du couvert végétal des massifs forestiers dégradés, par la plantation d'espèces végétales capables de limiter l'érosion éolienne et de résister à ces conditions extrêmes.

Originaire du sud-est des États-Unis, *Robinia pseudoacacia* L. est un arbre à croissance rapide de la famille des Fabaceae (APG IV). Il fut introduit en Méditerranée au XVII<sup>e</sup> siècle. Cette espèce peut se développer sur des sols dégradés, grâce, d'une part, à la présence de nodosités dans ses racines, permettant de réduire l'azote atmosphérique et d'enrichir ainsi les sols, et, d'autre part, à son système racinaire efficace qui peut s'étendre sur un rayon de 15 m autour du tronc sur les terrains secs (Brosse, 2000). *R. pseudoacacia* L. est souvent utilisé pour fixer les terrains menacés d'affaissement (digues, terre-pleins) et pour

reboiser les sols stériles, ce qui présente un grand potentiel dans la restauration de la végétation et la régénération des écosystèmes. Résistant à de nombreux stress environnementaux (basses et hautes températures, sécheresse, polluants atmosphériques), le robinier colonise naturellement remblais, talus et terrains vagues (Pokorny, 1987), faisant de lui une espèce invasive dans les régions humides.

Le stade jeune plantule est un passage délicat pour les arbres en raison de la fragilité des plantes ainsi que de leur sensibilité aux différents stress environnants.

Dans le but de mieux comprendre les effets du stress hydrique sur le robinier au stade jeune plant, ainsi que les mécanismes de résistance de cette espèce vis-à-vis d'un manque d'eau, un arrêt d'arrosage a été effectué sur des plantes de deux mois afin d'observer les effets du stress hydrique sur la morphologie, la croissance et le statut hydrique.



**Photo 2.**

Arbre adulte de *Robinia pseudoacacia* de la région de Tizi Ouzou, en Algérie.

Mature *Robinia pseudoacacia* tree from the Tizi Ouzou region in Algeria.  
Photo M. Toumi.

## Matériels et méthodes

### Matériel végétal

En prélude à la production de plants, des graines de *R. pseudoacacia* L. ont été récoltées au mois de décembre 2014 dans la région de Cherrhell (wilaya de Tipaza : 36°47'25"N, 2°37'30"E).

### Prétraitement des graines et germination

Les graines de *R. pseudoacacia* ont été désinfectées en les trempant 30 secondes dans de l'hypochlorite de sodium à 16 %, elles sont ensuite rincées abondamment à l'eau du robinet. Ce processus permet l'aseptisation des graines dans le but de les préparer à la germination. Pour lever leur inhibition tégumentaire, les graines de *R. pseudoacacia* ont été scarifiées mécaniquement en réalisant une petite incision au niveau du tégument avec un coupe-ongle. Les graines sont ensuite placées dans des boîtes de Petri (8,5 cm de diamètre) tapissées de quatre couches de papier filtre saturées en eau distillée, à raison de 20 graines par boîte. Les boîtes de Petri sont mises à l'obscurité dans une étuve à 28 °C. Un pourcentage maximal de germination de 83 % est atteint après trois jours d'expérimentation (Toumi *et al.*, 2017).

### Mise en culture des plants

Les graines germées sont mises à croître dans des pots de 1 700 cm<sup>3</sup>, remplis de terreau (CIEMHUS®), à raison de trois plantes par pot. Les pots sont entreposés dans une serre éclairée par la lumière du jour (température moyenne de 21 °C le jour et 17 °C la nuit). L'arrosage a lieu deux fois par semaine.

### Application du stress

À partir de la 10<sup>e</sup> semaine de mise en culture, les pots sont séparés en trois lots : un premier lot considéré comme témoin et arrosé régulièrement avec de l'eau du robinet, un deuxième lot stressé par arrêt d'arrosage pendant quatre semaines et un troisième lot réarrosé après quatre semaines d'arrêt d'arrosage durant deux semaines.

La mesure de différents paramètres est réalisée une fois par semaine pendant les six semaines d'expérimentation pour les plants des trois lots. Pour chaque mesure de chaque lot, six répétitions ont été réalisées sur les quatrième feuilles de plants pris au hasard.

### Paramètres mesurés

#### Paramètres physiologiques

Les paramètres physiologiques ci-après ont été mesurés :

- La teneur en eau du sol (TES) est définie selon Martínez *et al.* (2003) et déterminée par la formule suivante :

$$TES = PE/PS \times 100$$

où PE est le poids de l'eau contenue dans l'échantillon du sol et PS est le poids sec de l'échantillon.

Les mesures de la teneur en eau du sol ont été réalisées à l'aide de sondes Theta Probe ML3. Cette sonde permet de suivre les variations de la constante diélectrique apparente et de les convertir en teneur en eau gravimétrique sur la base d'étalonnage obtenue pour le substrat considéré.

- La teneur relative en eau (TRE) de la feuille a été déterminée par la méthode décrite par Barrs (1968). Les feuilles sont coupées à la base du limbe, pesées immédiatement pour obtenir le poids frais (PF) et mises dans des tubes à essai remplis d'eau distillée. Elles sont ensuite placées à l'obscurité pendant 24 h. Les feuilles sont retirées, séchées avec du papier absorbant, puis pesées de nouveau pour obtenir le poids à la turgescence (PT). Les échantillons sont enfin mis à l'étuve à 80 °C, pendant au moins 48 h et pesées pour avoir leur poids sec (PS). La teneur relative en eau est calculée par la formule suivante (Clarke et McCaig, 1982) :

$$TRE (\%) = (PF - PS) / (PT - PS) \times 100.$$

### Mesure de la conductance stomatique

La conductance stomatique est mesurée sur la quatrième feuille dans le sens acropète, en utilisant un poromètre (Decagon SC-1 *Porometer*). Ces mesures sont effectuées à 11h00, une fois par semaine, sur six plants de chaque lot.

### Mesure du degré d'ouverture stomatique

Le degré d'ouverture des stomates est déterminé par la mesure de la largeur de l'ostiole, qui est obtenue par la méthode des empreintes. Cette mesure a été réalisée chaque semaine sur la feuille numéro 4 des plantes témoins, stressées et réarrosées. Pour l'observation des stomates au microscope photonique, la face inférieure des feuilles est enduite d'une fine couche de vernis à ongles transparent. Après deux minutes de séchage à l'air libre, la pellicule de vernis sèche contenant les empreintes des ostioles est délicatement prélevée. Cette pellicule est disposée entre lame et lamelle puis observée au microscope photonique. La mesure de l'ouverture du stomate est réalisée sur la quatrième feuille de six plants de chaque lot grâce au logiciel Motic Images Plus 2.0. Pour chaque feuille, la taille de 50 ostioles a été mesurée.

### Paramètres morphologiques

#### Longueur des tiges et nombre de feuilles

Les mesures de la longueur de la tige ainsi que le nombre des feuilles ont été enregistrés chaque semaine dès la mise en pot pour les plants témoins, stressés et réhydratés pendant toute la durée de l'expérimentation en utilisant un mètre d'arpenteur (Fischer Darex 2m).

#### Surface foliaire

Un prélèvement de la quatrième feuille (numérotation acropète) a été effectué chaque semaine sur six plants choisis au hasard parmi chaque lot, témoin, stressé et réhydraté, pour la détermination de la surface foliaire. Une photo de chaque feuille a été prise et la surface foliaire a

été calculée par analyses d'images avec le logiciel Motic Images Plus 2.0.

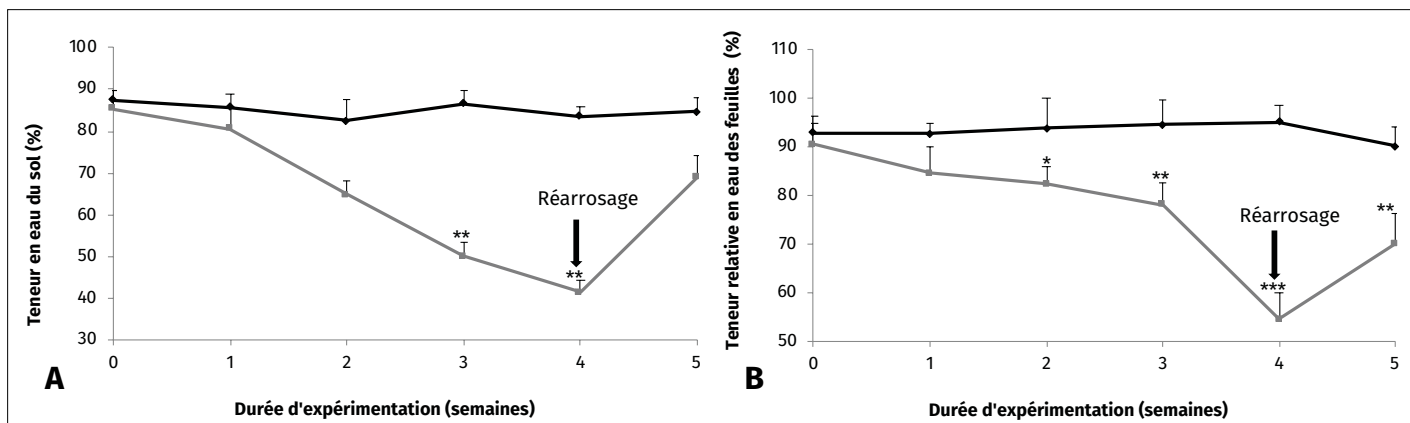
### Analyses statistiques

Les données sont présentées sous forme d'une moyenne de six répétitions  $\pm$  l'écart-type. Les données obtenues ont fait l'objet d'une analyse de la variance (Anova) à 1 facteur, pour évaluer les relations significatives entre les différents traitements. À chaque fois qu'il existe des différences significatives, les moyennes ont été séparées et classées par le test de Tukey. Toutes les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel Statistica 5.1 sous Windows.

## Résultats

### Effet du stress hydrique sur la teneur en eau du sol et la teneur relative en eau des feuilles

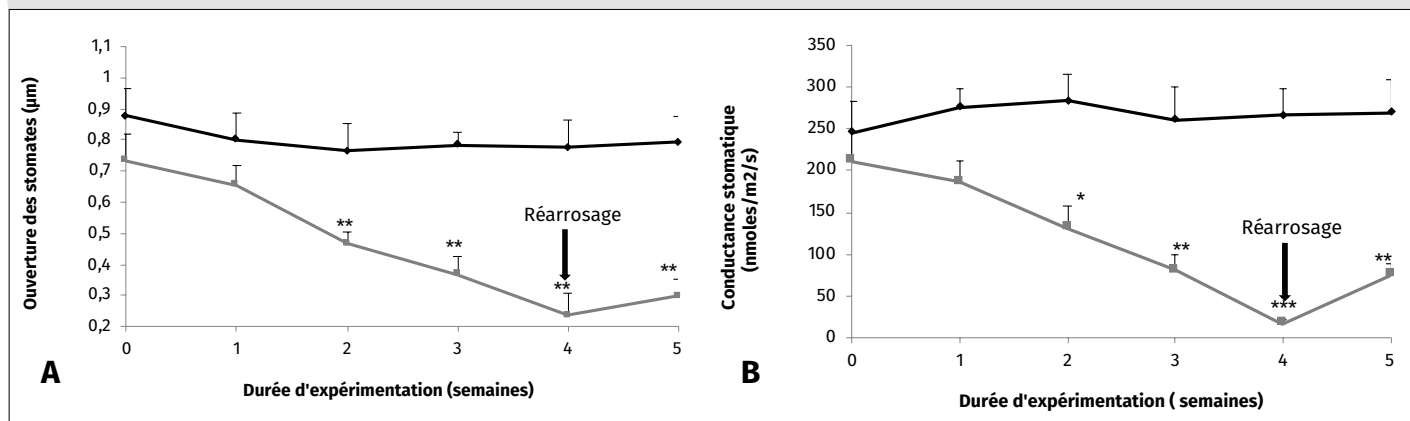
La teneur en eau du sol (TES) des pots témoins est de  $85,13 \pm 5,24\%$  ; elle ne varie pas tout au long de l'expérimentation. Les différences entre les teneurs en eau des pots des plants témoins et stressés sont significatives dès la deuxième semaine d'arrêt d'arrosage. Cependant, la teneur en eau du sol diminue progressivement et de manière constante dans les pots soumis au stress (figure 1.A). Après quatre semaines d'arrêt d'arrosage, la quantité d'eau du sol a diminué de plus de 50 %.



**Figure 1.**

Évolution de la teneur en eau du sol (A) et de la teneur relative en eau des feuilles (B) des plantes témoins (—◆—) et stressées (—■—) de *Robinia pseudoacacia* L. en fonction de la durée de l'expérimentation. Chaque point représente la moyenne de six répétitions. \*P < 0,05; \*\*P < 0,01; \*\*\*P < 0,001 représentent le niveau de significativité entre les plantes témoins et les plantes stressées aux différents points de mesure, par l'analyse de variance (Anova1), test de Tukey. Les barres verticales indiquent les écarts-types.

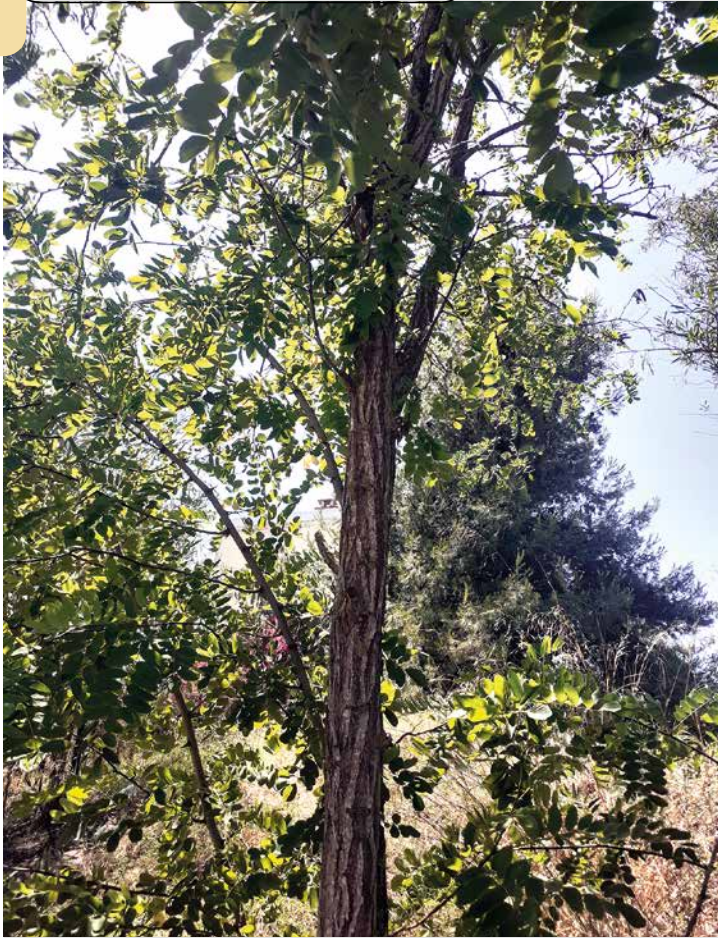
Changes in soil water content (A) and relative leaf water content (B) of control (—◆—) and stressed (—■—) *Robinia pseudoacacia* L. plants as a function of experimental duration. Each point represents the mean of six replicates. \*P < 0.05; \*\*P < 0.01; \*\*\*P < 0.001 represent the level of significance between controls and stressed plants at different measurement points, by analysis of variance (Anova1), Tukey test. Vertical bars indicate standard deviations.



**Figure 2.**

Évolution du degré d'ouverture des stomates (A) et de la conductance stomatique (B) des plantes témoins (—◆—) et stressées (—■—) de *Robinia pseudoacacia* L. en fonction de la durée de l'expérimentation. Chaque point représente la moyenne de six répétitions. \*P < 0,05; \*\*P < 0,01; \*\*\*P < 0,001 représentent le niveau de significativité entre les plantes témoins et les plantes stressées aux différents points de mesure, par l'analyse de variance (Anova1), test de Tukey. Les barres verticales indiquent les écarts-types.

Changes in the degree of stomatal opening (A) and stomatal conductance (B) of control (—◆—) and stressed (—■—) *Robinia pseudoacacia* L. plants as a function of experimental duration. Each point represents the mean of six replicates. \*P < 0.05; \*\*P < 0.01; \*\*\*P < 0.001 represent the level of significance between controls and stressed plants at different measurement points, by analysis of variance (Anova1), Tukey test. Vertical bars indicate standard deviations.



**Photo 3.**  
Jeune arbre de *Robinia pseudoacacia* de la région de Tizi Ouzou, en Algérie.  
Young tree of *Robinia pseudoacacia* from the Tizi Ouzou region in Algeria.  
Photo M. Toumi.

Par la suite, le réarrosage des pots a augmenté significativement la teneur en eau du sol qui atteint  $69,0\% \pm 4,29\%$  après une semaine.

La teneur relative en eau (TRE) des feuilles des plants témoins de *R. pseudoacacia* reste constante et supérieure à 92 % tout le long de l'expérimentation (figure 1.B). Chez les plantes stressées, la teneur relative en eau des feuilles diminue en fonction de la durée du stress. Durant les trois premières semaines d'arrêt d'arrosage, cette diminution reste graduelle et relativement faible, atteignant  $78,13 \pm 4,53\%$ . À la quatrième semaine d'arrêt d'arrosage, une chute brutale et très hautement significative de la TRE est observée chez les plantes stressées ( $54,48 \pm 5,64\%$ ). Le réarrosage des plantes stressées induit une augmentation rapide de la TRE qui atteint  $70,80 \pm 6,23\%$  après une semaine de réhydratation (figure 1.B).

#### Effet du stress hydrique sur l'évapotranspiration

L'arrosage régulier permet aux plants témoins de garder les stomates ouverts durant toute la durée de l'expérimentation avec une largeur d'ostiole comprise entre

$0,76 \pm 0,08$  et  $0,87 \pm 0,08 \mu\text{m}$ , optimisant ainsi les échanges gazeux et favorisant une forte conductance stomatique qui atteint une valeur maximale de  $283,64 \pm 27,10 \text{ mmol/m}^2/\text{s}$  (figures 2.A et B).

Chez les plantes stressées, la taille des ostioles diminue de moitié après deux semaines d'arrêt d'arrosage. Cette importante diminution continue jusqu'à la quatrième semaine d'arrêt d'arrosage pour atteindre  $0,23 \pm 0,07 \mu\text{m}$  seulement (figure 2.A). La réduction de la taille des ostioles s'accompagne d'une diminution tout aussi brutale et très hautement significative de la conductance stomatique qui passe de  $211,26 \pm 38,23 \text{ mmol/m}^2/\text{s}$  à  $17,11 \pm 2,14 \text{ mmol/m}^2/\text{s}$  en quatre semaines d'arrêt d'arrosage (figure 2.B). Le réarrosage des plantes stressées va favoriser l'ouverture des stomates ( $0,29 \pm 0,05 \mu\text{m}$ ), permettant ainsi l'amélioration de la conductance stomatique qui atteint  $75,48 \pm 09,24 \text{ mmol/m}^2/\text{s}$  après une semaine de réarrosage ; néanmoins, cette conductance, après une semaine de réhydratation des plants stressés, reste significativement moins importante que celle des plants témoins.

#### Effet du stress hydrique sur les paramètres de croissance

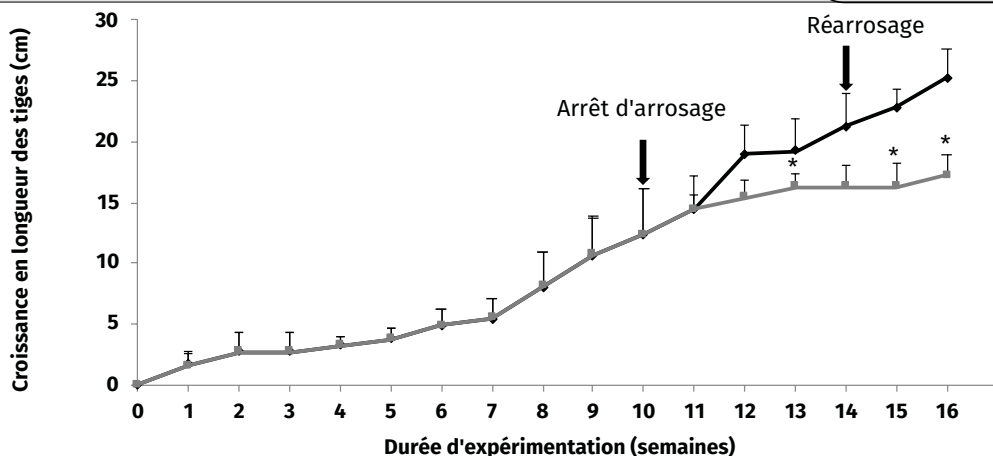
La figure 3 montre l'évolution de la croissance en longueur des tiges de *R. pseudoacacia*, enregistrée avant et après l'application du stress hydrique par arrêt d'arrosage puis réhydratation. Durant les premières semaines de l'expérimentation, la croissance en longueur des plantes de *R. pseudoacacia* est graduelle. Elle atteint une longueur moyenne de  $12,32 \pm 2,67 \text{ cm}$  après 10 semaines de croissance en pots. La croissance des tiges des plantes stressées est significativement réduite après deux semaines d'arrêt d'arrosage. En effet, la vitesse de croissance, qui était de  $1,86 \text{ cm}$  par semaine durant les quatre semaines précédant l'arrêt d'arrosage, passe à  $0,98 \text{ cm}$  par semaine après application de la contrainte hydrique, soit une réduction de 47 % de la vitesse de croissance. Le réarrosage des plantes stressées pendant deux semaines va induire une faible reprise de la croissance en longueur des tiges ( $5,64\%$ ). Cette croissance reste néanmoins significativement moins importante que celle des plants témoins.

Après dix semaines de croissance, les plantules témoins et stressées de *R. pseudoacacia* présentent en moyenne 8 feuilles. Chacune de ces feuilles est composée de 5 à 9 folioles.

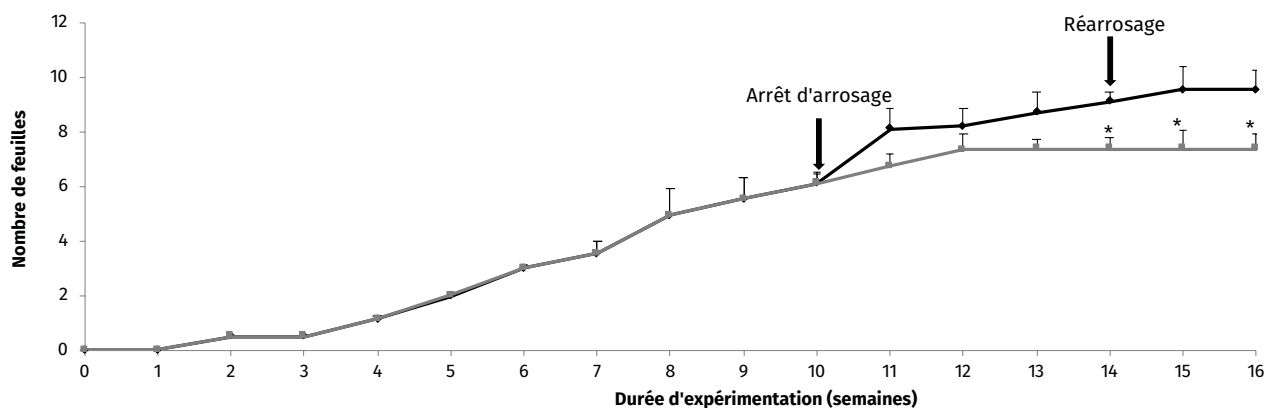
La diminution de la croissance des tiges de *R. pseudoacacia* suite à l'application du stress par arrêt d'arrosage s'accompagne d'une réduction significative du nombre de feuilles chez les plantes stressées (figure 4). Cette réduction atteint 20 % après deux semaines d'arrêt d'arrosage.

Après deux semaines de réarrosage, le nombre de feuilles ne varie pas chez les plantes stressées (figure 4).

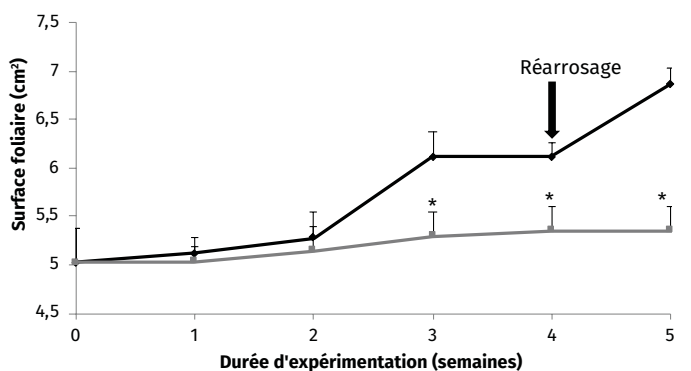
La surface foliaire après dix semaines de croissance en serre est de  $5,02 \pm 0,35 \text{ cm}^2$ . Durant les deux premières semaines d'expérimentation, la surface foliaire augmente légèrement chez toutes les plantes. À partir de la troisième semaine d'arrêt d'arrosage, une différence significative est observée entre la surface foliaire des plants témoins et



**Figure 3.** Croissance en longueur des tiges des plantes témoins (—◆—) et stressées (—■—) de *Robinia pseudoacacia* L. en fonction de la durée de l'expérimentation. Chaque point représente la moyenne de six répétitions. \*P < 0,05 ; \*\*P < 0,01 ; \*\*\*P < 0,001 représentent le niveau de significativité entre les plantes témoins et les plantes stressées aux différents points de mesure, par l'analyse de variance (Anova1), test de Tukey. Les barres verticales indiquent les écarts-types.  
 Stem length growth of control (—◆—) and stressed (—■—) *Robinia pseudoacacia* L. plants as a function of experimental duration. Each point represents the mean of fifty replicates \*P < 0,05, \*\*P < 0,01 and \*\*\*P < 0,001 represent the level of significance between control and stressed plants at different measurement points, by analysis of variance (Anova1), Tukey's test. Vertical bars indicate standard deviations.



**Figure 4.** Nombre de feuilles des plantes témoins (—◆—) et stressées (—■—) de *Robinia pseudoacacia* L. en fonction de la durée de l'expérimentation. Chaque point représente la moyenne de six répétitions. \*P < 0,05 ; \*\*P < 0,01 ; \*\*\*P < 0,001 représentent le niveau de significativité entre les plantes témoins et les plantes stressées aux différents points de mesure, par l'analyse de variance (Anova1), test de Tukey. Les barres verticales indiquent les écarts-types.  
 Number of leaves of control (—◆—) and stressed (—■—) *Robinia pseudoacacia* L. plants as a function of experimental duration. Each point represents the mean of six replicates. \*P < 0,05; \*\*P < 0,01; \*\*\*P < 0,001 represent the level of significance between controls and stressed plants at different measurement points, by analysis of variance (Anova1), Tukey test. Vertical bars indicate standard deviations.



**Figure 5.** Surface foliaire des plantes témoins (—◆—) et stressées (—■—) de *Robinia pseudoacacia* L. en fonction de la durée de l'expérimentation. Chaque point représente la moyenne de six répétitions. \*P < 0,05 ; \*\*P < 0,01 ; \*\*\*P < 0,001 représentent le niveau de significativité entre les plantes témoins et les plantes stressées aux différents points de mesure, par l'analyse de variance (Anova1), test de Tukey. Les barres verticales indiquent les écarts-types.  
 Leaf area of control (—◆—) and stressed (—■—) *Robinia pseudoacacia* L. plants as a function of experimental duration, each point representing the mean of six replicates. \*P < 0,05; \*\*P < 0,01; \*\*\*P < 0,001 represent the level of significance between controls and stressed plants at different measurement points, by analysis of variance (Anova1), Tukey test. Vertical bars indicate standard deviations.

stressées avec des valeurs respectives de  $6,12 \pm 0,34 \text{ cm}^2$  et de  $5,30 \pm 0,24 \text{ cm}^2$  (figure 5).

Après une semaine de réarrosage, la surface foliaire des plantes stressées reste stable et n'évolue pas.

## Discussion

Le manque d'eau est un facteur limitant de la croissance des plantes, particulièrement en régions méditerranéennes. Il induit chez les plantes stressées une diminution du contenu relatif en eau (Albouchi *et al.*, 2000 ; Liu *et al.*, 2017). La teneur relative en eau (TRE) est l'un des paramètres d'évaluation de la tolérance à la sécheresse, proposé par Clarke et McGaig (1982). Une comparaison entre

l'évolution de la teneur en eau des plantules de *R. pseudoacacia* a montré une diminution de la TRE en fonction de l'intensité du déficit hydrique. Cette diminution reste relativement faible durant les trois premières semaines d'arrêt d'arrosage. Les plantes ont pu restaurer une partie de l'eau perdue par évapotranspiration grâce à une forte absorption racinaire, ce qui entraîne une diminution progressive de la quantité d'eau du sol chez les plantes stressées durant cette période. Levitt (1980) constate que la capacité de maintenir un potentiel hydrique élevé a été considérée comme un mécanisme qui permet à la plante d'esquiver la déshydratation. Une TRE élevée dans des conditions de stress a été observée chez *Acacia tortilis* L. (Kebbas *et al.*, 2015), chez le raisin crimson (Conesa *et al.*, 2016) et chez *Parkinsonia aculeata* L. (Lassouane *et al.*, 2016). Les génotypes qui maintiennent une TRE élevée plus longtemps en présence de stress hydrique sont en général des génotypes tolérants (Nouri, 2002 ; Yang *et al.*, 2021).

À partir de la quatrième semaine, la TRE des plantes stressées chute suite à l'incapacité de la plante à maintenir la turgescence de ses cellules. La forte pression osmotique du milieu extérieur fait diminuer la teneur en eau chez la plante entière (Sairam *et al.*, 2001), entraînant une diminution de la mobilité des éléments nutritifs. Il y a aussi réduction du volume du milieu aqueux où se produisent les réactions biochimiques qui assurent le meilleur développement de la plante. Les molécules d'eau participent directement à de nombreuses réactions biochimiques d'hydrolyse ou de condensation. L'eau est aussi une source d'éléments minéraux essentiels pour le métabolisme des végétaux. L'effet dépressif de la carence en eau sur l'état hydrique de la plante peut être irréversible si la période de stress est prolongée, entraînant la mort de la plante (Casals, 1996). Après réarrosage, la quantité d'eau présente dans le sol augmente significativement, permettant la réhydratation de la plante et une augmentation de la TRE.

La réduction de la perte en eau par la fermeture stomatique est un moyen d'adaptation des plantes au stress hydrique (Gao, 2000). Le principe de fonctionnement des stomates repose essentiellement sur les variations du potentiel de turgescence dans les cellules de garde. Le degré de fermeture et d'ouverture des stomates varie en fonction des espèces (Gahrti-Chherti et Lales, 1990).

Lors de nos expérimentations, une réduction de la taille des ostioles, proportionnelle à la durée et à l'intensité du stress, a été observée. Cette fermeture des stomates s'accompagne d'une forte diminution de la conductance stomatique (Yin *et al.*, 2017 ; Bertolino *et al.*, 2019). Ce mécanisme de fermeture des stomates lors du stress a permis la réduction de la perte d'eau par transpiration, permettant ainsi aux plantes de *R. pseudoacacia* L. de maintenir une TRE relativement élevée lors des trois premières semaines d'arrêt d'arrosage.

La régulation de la conductance stomatique reste le mécanisme majeur intervenant à court terme pour limiter les pertes d'eau. Le potentiel hydrique foliaire sera maintenu d'autant plus longtemps que la fermeture des stomates est précoce. Celle-ci peut intervenir à des potentiels hydriques foliaires différents en fonction du génotype



**Photo 4.**  
Tronc de *Robinia pseudoacacia* avec des sillons de la région de Tizi Ouzou, en Algérie.  
Trunk of *Robinia pseudoacacia* with grooves from the Tizi Ouzou region in Algeria.  
Photo M. Toumi.



(Mojayad et Planchon, 1994) et du stade de développement (Morizet et Merrien, 1990).

Le stress hydrique entraîne une diminution de la croissance de l'appareil végétatif chez les plantules stressées (Hardie et Martin, 2000 ; Mishra *et al.*, 2018). Une diminution significative de la croissance en longueur des tiges est observée chez les plantes de *R. pseudoacacia*, après une semaine d'arrêt d'arrosage. La réduction de la teneur relative en eau des feuilles suite à l'application du stress induit une diminution de la pression de turgescence des cellules, provoquant ainsi un arrêt de l'élongation cellulaire qui se traduit par une réduction de la croissance. Le déficit hydrique induit également une réduction de la photosynthèse qui s'accompagne d'un déficit de la nutrition minérale. Celui-ci est dû principalement à des réductions de flux

d'éléments vers les racines, ce qui a pour conséquence une réduction de la croissance des plants (Kebbas *et al.*, 2015 ; Lassouane *et al.*, 2016 ; Dehghanipoodeh *et al.*, 2018).

Nous avons constaté qu'il n'y avait pas formation de nouvelles feuilles chez les plantes stressées après deux semaines d'arrêt d'arrosage, ce qui pourrait être dû à un arrêt de la division cellulaire. En effet, le déficit hydrique peut se traduire, selon la stratégie adaptative de chaque espèce, par des modifications morphologiques affectant la partie aérienne ou souterraine (Mishra *et al.*, 2018 ; Bhussal *et al.*, 2020).

Il faut néanmoins envisager la possibilité que deux semaines de réarrosage ne suffisent pas pour relancer les activités mitotiques qui permettent l'apparition de nouvelles feuilles. La plante pourrait avoir besoin de plus de temps pour former de nouvelles feuilles après réarrosage.

La surface foliaire est un facteur important de la transpiration. Une des premières réactions des plantes au déficit hydrique est de réduire la surface foliaire (Xu *et al.*, 2009 ; Patmi *et al.*, 2020). Une diminution importante de la surface foliaire est notée à partir de la troisième semaine d'arrêt d'arrosage. Cette diminution est une des réponses des végétaux à la déshydratation ; elle contribue à la conservation des ressources en eau, ce qui permet la survie de la plante (Misra *et al.*, 2020).

## Conclusion

L'application d'un stress hydrique par arrêt d'arrosage sur des plants de *Robinia pseudoacacia* provoque une réduction significative de la croissance des tiges, atteignant 77 %, ainsi qu'un arrêt de formation de nouvelles feuilles dès la deuxième semaine d'arrêt d'arrosage, ce qui pourrait être une stratégie adaptative se traduisant par une forte réduction du métabolisme physiologique afin de résister à cette contrainte.

La teneur relative en eau des feuilles des plantes de *R. pseudoacacia* reste stable durant les trois premières semaines d'arrêt d'arrosage grâce, d'abord, à une forte absorption de l'eau par les racines, permettant ainsi à la plante de régénérer la quantité d'eau perdue par les feuilles, mais grâce, aussi, à la fermeture rapide des stomates dès l'application du stress. Ces deux mécanismes induisent une réduction considérable de la quantité d'eau perdue par évapotranspiration, procurant ainsi aux plants de *R. pseudoacacia* une importante résistance au stress hydrique.

Le réarrosage des plants après la période de stress va leur permettre de retrouver une bonne conductance stomatique ainsi qu'une teneur relative en eau élevée, grâce à l'absorption de l'eau du sol, ce qui témoigne d'une forte capacité des jeunes plantes de *R. pseudoacacia* à reprendre une activité physiologique normale après un arrêt d'arrosage de quatre semaines.



**Photo 5.**  
 Mise en pots de graines de *Robinia pseudoacacia* dans la serre de l'INRF à Alger, en Algérie.  
 Potting of *Robinia pseudoacacia* seeds in the greenhouse of INRF in Algiers, Algeria.  
 Photo M. Toumi.

### Remerciements

Nous tenons à remercier tout particulièrement le staff de l'Institut national de la recherche forestière (INRF) et, à sa tête, monsieur Ouahid Zendouche, pour leur disponibilité et pour toute l'aide qu'ils nous ont fournie lors de la réalisation de ce travail.

### Financement

Cette étude a été financée en partie par le premier auteur : Mohamed Toumi (10 %) et par l'Institut national de la recherche forestière (INRF), Alger, Algérie (90 %).

### Conditions d'accès aux données

Les données de cette étude sont accessibles en adressant une requête auprès de l'auteur correspondant, à l'adresse mail : [t\\_med@hotmail.com](mailto:t_med@hotmail.com)

## Références

- Albouchi A., Sebei H., Mezni M. Y., El Aouni M. H., 2000. Influence de la durée d'une alimentation hydrique déficiente sur la production de la biomasse, la surface transpirante et la densité stomatique d'*Acacia cyanophylla*. *Annales de l'INRGREF*, 4 : 138-161.
- Barrs H. D., 1968. Determination of water deficits in plant tissues. In: Kozlowski T. T. (ed.). *Water deficits and plant growth*. Vol. 1. New York and London, Academic Press, 235-368.
- Belkhdja M., Bidai Y., 2004. Réponse des graines d'*Atriplex halimus* L. à la salinité au stade de la germination. *Sécheresse*, 15 (4) : 331-335.
- Bensouia R., 2003. Du Nord au Sud : le recours à l'environnement, le retour des paysans ? La lutte contre la désertification dans la steppe algérienne : les raisons de l'échec de la politique environnementale. Communication aux 15<sup>es</sup> Journées de la Société d'écologie humaine, Marseille, 11-12 décembre 2003, 22 p.
- Bertolino L. T., Caine R. S., Gray J. E., 2019. Impact of stomatal density and morphology on water-use efficiency in a changing world. *Frontiers in Plant Science*, 10: 225. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00225>
- Bhusal N., Lee M., Han A. R., Han A., Kim H. S., 2020. Responses to drought stress in *Prunus sargentii* and *Larix kaempferi* seedlings using morphological and physiological parameters. *Forest Ecology and Management*, 465: 118099. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118099>
- Brosse J., 2000. *Larousse des Arbres et des Arbustes*. Paris, France, Larousse, 351 p.
- Casals M. L., 1996. Introduction des mécanismes de résistance à la sécheresse dans un modèle dynamique de croissance et de développement du blé dur. Thèse de doctorat de l'INRA Paris Grignon, France, 93 p.
- Clarke J. M., McCaig T. N., 1982. Evaluation of techniques for screening for drought resistance in wheat. *Crop Science*, 22: 1036-1040. <https://doi.org/10.2135/cropsci1982.0011183X002200030015x>
- Conesa M. R., de la Rosa J. M., Domingo R., Bañon S., Pérez-Pastor A., 2016. Changes induced by water stress on water relations, stomatal behaviour and morphology of table grapes (cv. Crimson Seedless) grown in pots. *Scientia Horticulturae*, 202: 9-16. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.02.002>
- Dehghanipoodeh S., Ghobadi C., Baninasab B., Gheysari M., Shiranibidabadi S., 2018. Effect of silicon on growth and development of strawberry under water deficit conditions. *Horticultural Plant Journal*, 4 (6): 226-232. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2018.09.004>
- FAO, 1992. Le rôle de la foresterie dans la lutte contre la désertification. Rome, Italie, FAO, 356 p.
- Gahrti-Chhetri G. B., Lales J. S., 1990. Biochemical and physiological responses of nine spring wheat (*Triticum aestivum*) cultivars to drought stress at reproductive stage in the tropics. *Belgian Journal of Botany*, 123 (2): 27-35. <https://www.jstor.org/stable/20794192>
- Gao W. J., 2000. The experimental technology of plant physiology. Xian, China, World Book Press, 89-258.
- Gudmundsson L., Leonard M., Do H. X., Westra S., Seneviratne S. I., 2019. Observed trends in global indicators of mean and extreme streamflow. *Geophysical Research Letters*, 46 (2): 756-766. <https://doi.org/10.1029/2018GL079725>
- Guiot J., Cramer W., 2016. Climate change: The 2015 Paris Agreement thresholds and Mediterranean basin ecosystems. *Science*, 354 (6311): 465-468. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aah5015>
- Hardie W. J., Martin S. R., 2000. Shoot growth on de-fruited grapevines: a physiological indicator for irrigation scheduling. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 6: 52-58. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2000.tb00162.x>
- Kebbas S., Lutts S., Aid F., 2015. Effect of drought stress on the photosynthesis of *Acacia tortilis* subsp. *raddiana* at the young seedling stage. *Photosynthetica*, 53 (2): 288-298. <https://doi.org/10.1007/s11099-015-0113-6>
- Kim J., van Iersel M. W., 2011. Slowly developing drought stress increases photosynthetic acclimation of *Catharanthus roseus*. *Physiologia Plantarum*, 143 (2): 166-177. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2011.01493.x>
- Kramer P. J., Boyer J. S., 1995. *Water relations of plants and soils*. New York, USA, Academic Press, 495 p. <http://udspace.udel.edu/handle/19716/2830>
- Lassouane N., Aid F., Lutts S., 2016. Drought inhibits early seedling establishment of *Parkinsonia aculeata* L. under low light intensity: a physiological approach. *Plant Growth Regulation*, 80 (2): 115-126. <https://doi.org/10.1007/s10725-016-0148-0>
- Levitt J., 1980. Responses of plants to environmental stresses: Water, radiation, salt, and other stresses. Volume II. 2nd ed. New York, USA, Academic Press, 607 p.
- Liu Y., Li P., Xu G. C., Xiao L., Ren Z. P., Li Z. B., 2017. Growth, morphological, and physiological responses to drought stress in

*Bothriochloa ischaemum*. *Frontiers in Plant Science*, 8: 230. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00230>

Martínez J. P., Ledent J. F., Bajji M., Kinet J. M., Lutts S., 2003. Effect of water stress on growth, Na<sup>+</sup> and K<sup>+</sup> accumulation and water use efficiency in relation to osmotic adjustment in two populations of *Atriplex halimus*. *Plant Growth Regulation*, 41: 63-73. <https://doi.org/10.1023/A:1027359613325>

MATE, 2002. Rapport annuel du Plan national d'actions pour l'environnement et le développement durable. Alger, Algérie, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, 140 p.

Mishra B. K., Srivastava J. P., Lal J. P., 2018. Drought resistance in Lentil (*Lens culinaris* Medik.) in relation to morphological, physiological parameters and phenological developments. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7 (1): 2288-2304. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.701.277>

Misra V., Solomon S., Mall A. K., Prajapati C. P., Hashem A., Abd Allah E. F., et al., 2020. Morphological assessment of water stressed sugarcane: A comparison of waterlogged and drought affected crop. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 27 (5): 1228-1236. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.02.007>

Mojayad F., Planchon C., 1994. Stomatal and photosynthetic adjustment to water deficit as the expression of heterosis in sunflower. *Crop Science*, 34: 103-107. <https://doi.org/10.2135/cropsci1994.0011183X003400010018x>

Morizet J., Merrien A., 1990. Principaux traits du comportement hydrique du tournesol. In : Blanchet R., Merrien A. Le tournesol et l'eau. Adaptation à la sécheresse, réponse à l'irrigation. Paris, France, CETIOM, 7-21.

Nouri L., 2002. Ajustement osmotique et maintien de l'activité photosynthétique chez le blé dur (*Triticum durum*, Desf.), en condition de déficit hydrique. Thèse de magistère en Biologie végétale, Université de Mentouri, Constantine, Algérie, 77 p.

Patmi Y. S., Pitoyo A., Solichatun, Sutarno, 2020. Effect of drought stress on morphological, anatomical, and physiological characteristics of Cempo Ireng Cultivar Mutant Rice (*Oryza sativa* L.) strain 51 irradiated by gamma-ray. *Journal of Physics: Conference Series*, 1436: 012015. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1436/1/012015>

Pokorny J., 1987. Arbres. Paris, France, Gründ, 118 p.

Sairam R. K., Chandrasekhar V., Srivastava G. C., 2001. Comparison of hexaploid and tetraploid wheat cultivars in their responses to water stress. *Biologia Plantarum*, 44: 89-94. <https://doi.org/10.1023/A:1017926522514>

Toumi M., Barris S., Seghiri M., Cheriguene H., Aid F., 2017. Effet de plusieurs méthodes de scarification et du stress osmotique sur la germination des graines de *Robinia pseudoacacia* L. *Comptes Rendus Biologies*, 340 (5) : 264-270. <https://doi.org/10.1016/j.crvbi.2017.02.002>

Wang W., Vinocur B., Altman A., 2003. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance. *Planta*, 218 (1): 1-14. <https://doi.org/10.1007/s00425-003-1105-5>

Xu F., Guo W., Xu W., Wei Y., Wang R., 2009. Leaf morphology correlates with water and light availability: What consequences for simple and compound leaves. *Progress in Natural Science*, 19 (12): 1789-1798. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2009.10.001>

Yang X., Lu M., Wang Y., Wang Y., Liu Z., Chen S., 2021. Response mechanism of plants to drought stress. *Horticulturae*, 7 (3): 50. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7030050>

Yin X., Biswal A. K., Dionora J., Perdigon K. M., Balahadia C. P., Mazumdar S., et al., 2017. CRISPR-Cas9 and CRISPR-Cpf1 mediated targeting of a stomatal developmental gene *EPFL9* in rice. *Plant Cell Reports*, 36 (5): 745-757. <https://doi.org/10.1007/s00299-017-2118-z>

Zou H., Gao G. Y., Fu B. J., 2016. The relationship between grassland ecosystem and soil water in arid and semiarid areas: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 36: 3127-3136. [https://www.researchgate.net/publication/304954852\\_The\\_relationship\\_between\\_grassland\\_ecosystem\\_and\\_soil\\_water\\_in\\_arid\\_and\\_semiarid\\_areas\\_A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/304954852_The_relationship_between_grassland_ecosystem_and_soil_water_in_arid_and_semiarid_areas_A_review)

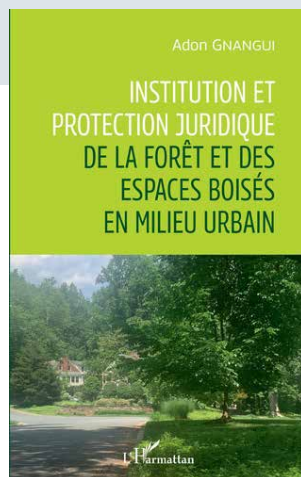
### Toumi et al. – Contribution des auteurs

Rôle du contributeur	Noms des auteurs
Conceptualisation	M. Toumi, F. Aid
Analyse formelle	M. Toumi
Enquête et investigation	M. Toumi
Gestion de projet	S. Berka
Ressources	M. Toumi, S. Berka
Supervision	F. Aid
Validation	M. Toumi, F. Aid
Visualisation	M. Toumi, S. Barris
Écriture – Préparation de l'ébauche originale	M. Toumi
Écriture – Révision et édition	M. Toumi, S. Barris, F. Aid

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



0006-579X

GNANGUI A., 2022. **INSTITUTION ET PROTECTION JURIDIQUE DE LA FORÊT ET DES ESPACES BOISÉS EN MILIEU URBAIN**. FRANCE, ÉDITIONS L'HARMATTAN, 166 P.

Les enjeux environnementaux et les conséquences sur la vie humaine de la déforestation préoccupent à juste titre le monde. Cet essai nous montre toutefois que la transposition du patrimoine forestier en milieu urbain est une solution efficace pour y remédier. L'étude nous montre que, tant en milieu rural qu'urbain, la forêt procure les mêmes bienfaits au plan écologique et climatique. Aussi, en milieu urbain, elle contribue à la régulation des pollutions acoustique et atmosphérique. Il serait désormais nécessaire pour les administrateurs des villes d'intégrer l'institution des forêts dans leur politique de gestion et de disposer de mesures juridiquement contraignantes. Cet ouvrage est accessible à toute personne éprise de qualité de vie urbaine et d'équilibre écologique.

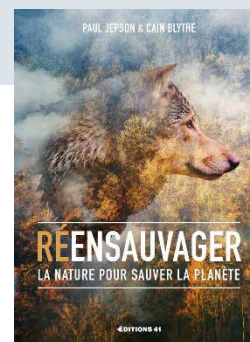
*Résumé adapté de celui de l'éditeur.*  
Éditions L'Harmattan,  
5-7 rue de l'École Polytechnique,  
75005 Paris, France.  
[www.editions-harmattan.fr](http://www.editions-harmattan.fr)



EBA'A ATYI R., HIOL HIOL F., LESCUYER G., MAYAUX P., DEFOURNY P., BAYOL N., SARACCO F., POKEM D., SUFO KANKEU R., NASI R., 2022. **LES FORÊTS DU BASSIN DU CONGO : ÉTAT DES FORÊTS 2021**. INDONÉSIE CIFOR-ICRAF, 459 P.

Le rapport État des Forêts du bassin du Congo est publié périodiquement pour présenter les écosystèmes forestiers d'Afrique centrale et leur environnement de gestion. Faisant suite à l'édition 2015 qui a été entièrement consacrée aux changements climatiques, le rapport 2021 comporte quatre parties dont la première dresse un bilan effectif de l'état de la ressource qui est de plus en plus reconnue au niveau mondial comme étant un massif forestier essentiel pour la séquestration du carbone et la conservation de la diversité biologique. Le présent rapport met en perspective les écosystèmes forestiers du bassin du Congo dans le contexte mondial caractérisé par des débats qui orienteront la gestion de toutes les forêts tropicales du monde pendant les décennies à venir. Il aborde aussi des thématiques d'actualité telles que la gestion des tourbières et les interrogations sur la relation entre la gestion des ressources de la biodiversité et l'émergence ou la réémergence de maladies zoonotiques dont la Covid-19 a particulièrement affecté le contexte de sa rédaction. Enfin, ce rapport identifie les principaux défis qui doivent être relevés, pour parvenir à une gestion durable des écosystèmes forestiers du bassin du Congo, afin qu'elle contribue au mieux à l'amélioration des moyens de subsistance et du cadre de vie des populations locales et des peuples autochtones.

*Résumé adapté de celui de l'éditeur.*  
Jalan CIFOR, Situ Gede, Bogor Barat,  
Bogor 16115, Jawa Barat, Indonesia.  
[www.cifor.org](http://www.cifor.org)



JEPSON P., BLYTHE C., 2022. **REËNSAUVAGER LA NATURE POUR SAUVER LA PLANÈTE**. FRANCE, ÉDITIONS 41, 224 P.

Sous la pression de l'urbanisation, de la déforestation, de l'exploitation agricole et du réchauffement climatique, la faune et la flore disparaissent en nombre. Les scientifiques estiment même qu'une sixième extinction est à l'œuvre et qu'elle menace à terme la survie de notre espèce. Pour répondre à ce péril, une solution révolutionnaire est envisagée : le réensauvagement. Imaginez des troupeaux de bisons, de chevaux sauvages et d'aurochs au cœur de l'Europe. Des lynx, des castors, des loups et des ours cohabitent dans une nature résiliente et à la biodiversité restaurée. Telle est la promesse du réensauvagement. Ce concept vise à protéger ou reconstituer les écosystèmes en laissant la nature évoluer spontanément et sans entrave, hors de toute influence humaine. Quitte, au départ, à initier la dynamique en réintroduisant les espèces, végétales ou animales, disparues ou menacées qui y vivaient autrefois. Le rôle des grands herbivores, grâce auxquels les clairières et les prairies subsistent, est particulièrement central ; de leur présence dépend celle de nombreuses espèces d'oiseaux, d'insectes, de petits mammifères, de grands carnivores et même de plusieurs essences d'arbres. Le réensauvagement permet non seulement de lutter contre le déclin de la biodiversité, mais également contre le réchauffement climatique, grâce à la captation supérieure de carbone à laquelle il est associé. Rédigée par deux experts du domaine, cette référence accessible à tous et abondamment illustrée constitue une introduction passionnante et sans équivalent à la science du réensauvagement.

*Résumé adapté de celui de l'éditeur.*  
La Rurale d'Édition 41,  
11 rue Louis Joseph Philippe,  
41000 Blois, France.  
[www.epflpress.org](http://www.epflpress.org)

# Ajustement d'un système d'équations de volumes marchands pour le chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd.) en Tunisie

Tahar SGHAIER<sup>1</sup>  
Youssef AMMARI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Carthage  
Institut national de recherches en génie rural, eaux et Forêts (INRGREF)  
Rue Hédi EL Karray El Menzah IV  
BP 10, Ariana 2080  
Tunisie

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



**Photo 1.**  
Peuplement pur de chêne zéen, *Quercus canariensis* Willd.  
*Pure stand of Zea oak, Quercus canariensis Willd.*  
Photo T. Sghaier

**Doi :** 10.19182/bft2022.354.a36817 – Droit d'auteur © 2022, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 21 décembre 2021 ; date d'acceptation : 18 août 2022 ; date de publication : 1er décembre 2022.



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

## Citer l'article / To cite the article

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. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2022.354.a36817>

## RÉSUMÉ

### Ajustement d'un système d'équations de volumes marchands pour le chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd.) en Tunisie

Des tarifs de cubage globaux et des équations de volumes à diamètre et longueur variables ont été ajustés à l'aide d'un système d'équations simultanées pour le chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd.), en Tunisie. Les données utilisées proviennent de 75 arbres échantillonnés dans la forêt de chêne zéen localisée dans la région d'Ain Sallem au Nord-Ouest du pays. La méthode d'ajustement adoptée est celle de la régression non linéaire sans corrélation apparente (NSUR : *Non-linear Seemingly Unrelated Regression equations*), basée sur les moindres carrés généralisés. Vu le caractère longitudinal des données utilisées qui engendre une autocorrélation entre les erreurs successives issues des observations en provenance d'une même tige, un processus autorégressif d'ordre 2 sur ces erreurs a été incorporé dans le modèle d'ajustement des paramètres des différentes équations étudiées. Le système d'équations obtenu permet d'estimer avec des degrés de précision qui varient de 97 à 99 % : le volume total du bois fort des arbres entiers et des grumes jusqu'à une découpe quelconque ; le volume entre deux niveaux de la grume ; le diamètre à une hauteur donnée ainsi que la hauteur à un diamètre de découpe donné de la grume. Grâce à ces équations, des tables de cubage d'estimation des volumes globaux et marchands des arbres et des grumes de chêne zéen ont été générées, ce qui représente un outil flexible, précis et pratique pour la gestion adéquate de la forêt de chêne zéen en Tunisie et dans les autres pays méditerranéens.

**Mots-clés :** *Quercus canariensis*, chêne zéen, tarifs globaux, tarifs marchands, équations simultanées, Tunisie.

## ABSTRACT

### Adjusting a system of marketable volume equations for *Quercus canariensis* Willd. in Tunisia

Equations for total and commercial volumes of *Quercus canariensis* (zean oak) in Tunisia were adjusted by using a system of simultaneous equations. We used data for 75 sampled trees from the *Quercus canariensis* forest located at Ain Sallem in the north-west of the country. Nonlinear Seemingly Unrelated Regression (NSUR), based on the generalized least squares method, was used to adjust the system of volume equations. To take into account the inherent autocorrelation in the longitudinal data between successive errors from observations of the same stem, we applied a second-order continuous-time autoregressive error structure, which allows equations to be applied to irregularly spaced, unbalanced data. The adjusted system of equations can predict the following with 97 to 99% accuracy: (i) the total volume of sound wood in whole trees and the volume of stems up to a given cut, (ii) the volume between two heights of the stem, and (iii) the diameter at a given height and the height at a given cutting diameter of the stem. Thanks to these equations, volume tables were generated to estimate total and marketable tree and stem volumes for zean oak, which provide an accurate, flexible and practical tool to support sustainable management of zean oak forests in Tunisia and other Mediterranean countries.

**Keywords:** *Quercus canariensis*, zean oak, equations for total volume, equations for marketable volume, simultaneous equations, Tunisia.

## RESUMEN

### Ajuste de un sistema de ecuaciones de volumen de mercado para el roble andaluz (*Quercus canariensis* Willd.) en Túnez

Se ajustaron las tasas de cubicación global y las ecuaciones de volumen de diámetro y longitud variables mediante un sistema de ecuaciones simultáneas para el roble andaluz (*Quercus canariensis* Willd.), en Túnez. Los datos utilizados proceden de 75 árboles muestreados en un bosque de roble andaluz situado en la región de Ain Sallem, en el noroeste del país. El método de ajuste adoptado y el de regresión no lineal sin correlación aparente (NSUR: ecuaciones de regresión no relacionadas aparentemente no lineales) se basa en los mínimos cuadrados generalizados. Dado el carácter longitudinal de los datos utilizados, que genera una autocorrélation entre los errores sucesivos provenientes de las observaciones de un mismo tallo, se incorporó al modelo un proceso autorregresivo de segundo orden sobre estos errores para ajustar los parámetros de las distintas ecuaciones estudiadas. El sistema de ecuaciones resultante permite realizar estimaciones con grados de precisión que varían del 97 al 99 %: (i) el volumen total de madera dura de árboles enteros y rollos hasta cualquier corte, (ii) el volumen entre dos niveles del rollo, y (iii) el diámetro a una altura determinada, así como la altura a un diámetro de corte determinado del rollo. Gracias a estas ecuaciones, se han generado tablas de cubicación para estimar los volúmenes globales y de mercado de los árboles y rollos de roble andaluz, lo que representa una herramienta flexible, precisa y práctica para la gestión adecuada del bosque de roble andaluz en Túnez y los países mediterráneos.

**Palabras clave:** *Quercus canariensis*, roble andaluz, tarifas globales, tarifas comerciales, ecuaciones simultáneas, Túnez.

## Introduction

Les tarifs de cubage constituent des outils indispensables pour la gestion et l'aménagement des forêts et forment la base de calcul de la croissance et de la production des espèces forestières ligneuses. Il s'agit des outils d'estimation indirecte du volume ( $V$ ) d'un arbre par l'intermédiaire des variables ou paramètres faciles à mesurer, tels que le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) et la hauteur totale ( $H$ ) de l'arbre (Rondeux, 1993). On distingue souvent deux principaux types de tarifs : tarif à une entrée qui exprime le volume d'un arbre en fonction de son DHP et tarif à deux entrées qui exprime le même volume en fonction du DHP et de la hauteur totale de l'arbre (Bouchon, 1974). Les tarifs à une entrée sont moins précis que les tarifs à deux entrées, bien qu'ils soient plus simples et plus rapides à mettre en œuvre. La relation entre le DHP et la hauteur de l'arbre peut varier en fonction de l'âge de l'arbre, ce qui limite l'utilisation des tarifs à une entrée (Pardé et Bouchon, 1988). Des tarifs à trois variables peuvent être construits, quoique leur utilisation ne soit pas recommandée car ils utilisent des mesures plus difficiles et plus coûteuses à obtenir (Rondeux, 1993). La troisième variable peut être par exemple la hauteur à une certaine découpe ou le diamètre à une certaine hauteur de l'arbre. Des tarifs dits tarifs paramétrés peuvent également être développés ; ils utilisent une variable supplémentaire décrivant certaines caractéristiques moyennes du peuplement telles que le rapport de la hauteur sur le DHP des arbres dominants. Les tarifs paramétrés permettent d'avoir un aperçu de la forme de la tige à cuber tout en minimalisant les coûts de la prise de mesure (Prégent *et al.*, 2001). Les tarifs de cubage dits tarifs classiques ou tarifs globaux permettent en général d'estimer le volume total bois fort (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. De tels tarifs sont actuellement disponibles en Tunisie pour quelques espèces résineuses telles que le pin d'Alep, *Pinus halepensis* Mill. (Sghaier *et al.*, 2008), le pin pignon, *Pinus pinea* (Sghaier *et al.*, 2013), et le thuya, *Tetraclinis articulata* (Calama *et al.*, 2012).

Pour répondre aux exigences de l'industrie du bois et s'adapter à la diversification de la demande en produits forestiers ligneux, d'autres techniques d'ajustement des équations de cubage plus sophistiquées sont apparues. Il s'agit de tarifs de cubage plus flexibles qui permettent de prédire le volume de bois jusqu'à des découpes variées (Prégent *et al.*, 2001 ; Thibaut *et al.*, 1998 ; Fonweban et Houllier, 1997). Différentes équations permettant d'exprimer le rapport de volume jusqu'à une découpe quelconque (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). Combinées à une équation d'estimation du volume total ( $V$ ) de la tige d'un arbre, ces équations de rapport de volume

permettent 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 Houllier, 1997). Partant du principe que, pour un niveau de coupe donné ( $d$  et  $h$  fixes), les deux rapports de volume doivent être identiques, des équations de défilement de la tige peuvent être générées. 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 :  $h = f(D, H, d)$ . Ces fonctions trouvent leurs utilisations dans l'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 Houllier, 1997).

Cette étude vise à élaborer des tarifs de cubage globaux et des tarifs à longueur et à diamètre variables d'utilisation pour le chêne zéen, *Quercus canariensis*, en Tunisie. Les données utilisées dans cette étude proviennent des coupes effectuées dans la zénaie d'Ain Sallem (région d'Ain Draham au Nord-Ouest de la Tunisie) au début du mois d'avril 2020, où plus de 400 arbres de chêne zéen dont l'âge dépasse pour certains arbres les 200 ans ont été coupés. Pour étudier les impacts écologiques, biologiques, environnementaux et socio-économiques de ces coupes et proposer un programme de réhabilitation de la zénaie touchée par celles-ci, le ministère de l'Agriculture a désigné un comité scientifique multi-institutionnel et pluridisciplinaire regroupant des représentants de différents ministères et des organisations non gouvernementales (ONG). C'est dans le cadre des travaux de ce comité que tous les arbres coupés ont été inventoriés et géolocalisés. La disponibilité de ces arbres déjà coupés constitue une occasion exceptionnellement rare à saisir afin d'élaborer des tarifs de cubage globaux et marchands pour le chêne zéen en Tunisie. Ces tarifs seront des outils indispensables pour réussir les futurs programmes d'aménagement et de gestion soutenables des différents peuplements de cette espèce en Tunisie et dans les pays voisins.

## Matériels et méthodes

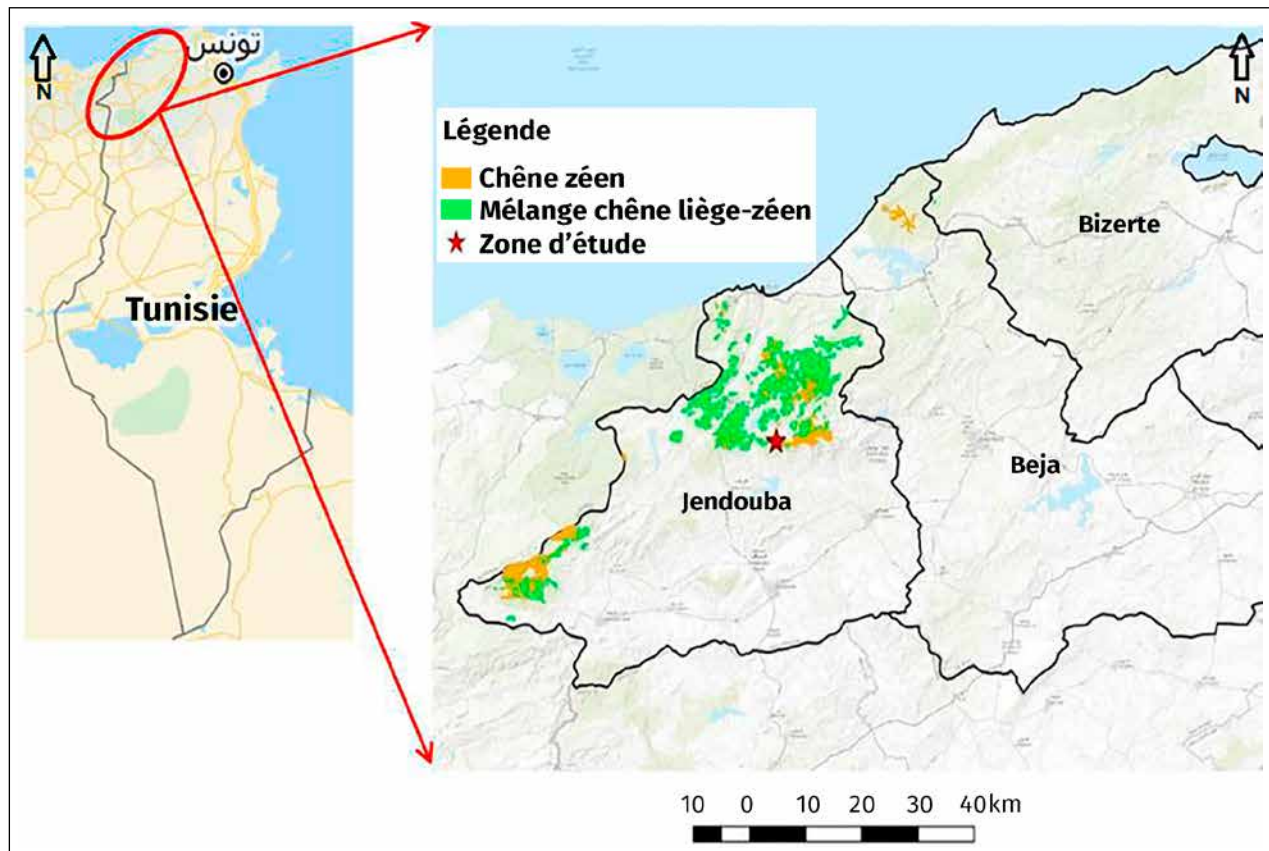
### La zénaie en Tunisie

Le chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd.) est localisé dans la péninsule Ibérique (Espagne, Portugal) et en Afrique du Nord (Maroc, Tunisie). Il est endémique de l'Afrique du Nord et de la péninsule Ibérique et considéré en Tunisie comme l'une des rares espèces à constituer des forêts de feuillus. En Tunisie, le chêne zéen est une espèce protégée qui se situe essentiellement en Kroumirie avec quelques îlots aux Mogods et une station au Cap Bon (Mechergui *et al.*, 2022). Selon le dernier inventaire forestier tunisien (DGF, 2010), la superficie du chêne zéen en peuplements naturels purs est de l'ordre de 8 332 ha (1,23 % de la superficie fores-

tière totale), répartis sur les deux gouvernorats de Jendouba (7 960 ha) et Béja (372 ha). Le chêne zéen se rencontre également en peuplements mixtes (13 651 ha), essentiellement en mélange avec du chêne-liège, *Quercus suber* L. Les peuplements purs de chêne zéen en Tunisie montrent une densité moyenne à forte, allant de 200 tiges/ha à El Feidja et Oued Zéen, 300-350 tiges/ha à Bni-Mtir, voire plus de 800 tiges/ha à Ain Zana, avec un taux de recouvrement qui peut atteindre 100 %. Du point de vue bioclimatique, le chêne zéen se limite aux variantes tempérée et fraîche du bioclimat humide, et, à un degré moindre, au subhumide (Rabhi, 2011). Toutefois, il peut se développer dans le subhumide frais et il n'est pas absent dans l'humide chaud, son optimum de production étant atteint dans le supra-méditerranéen (Quézel et Médail, 2003). Du point de vue des précipitations, le chêne zéen est très exigeant et nécessite annuellement plus de 800 mm de pluies (Boudy, 1955), et ne prend son développement optimal que dans les zones recevant 1 000 mm et plus (Quézel et Médail, 2003). Les premiers peuplements apparaissent en Tunisie avec des précipitations annuelles supérieures à 800 mm et se localisent surtout dans les hauteurs. Aux basses altitudes, on trouve le chêne zéen dans les dépressions (cuvettes) ou au fond des ravins ou encore sur les versants exposés au Nord et Nord-Ouest. C'est un arbre qui peut vivre plus de 200 ans, atteignant parfois plus de 30 m de hauteur et plus de 2 m de diamètre du tronc à 1,30 m du sol, avec un fût très élancé et un houppier étalé en peuplements clairs

et fastigié dans les formations très denses (Rabhi, 2011). Toutefois, bien que le bois de cette essence, très dur et très dense avec une excellente résistance aux chocs, ne présente pas des qualités appropriées pour certains usages, il garde son utilité pour la confection des poutres de ponts, le bois de service (piquets de mines, perches...), le parquet, les manches d'outils. Il donne aussi un bon bois de chauffage et un charbon de qualité. Pour les traverses de chemin de fer, utilisées par le passé, il ne donne pas entière satisfaction pour cet emploi car les fibres, une fois soumises aux sels de fer et à l'humidité, se désorganisent sous le rail (Mazghrane et Messaoud, 1990).

La zone d'étude, localisée dans la forêt d'Ain Sallem de la délégation d'Ain Drahem au Nord-Ouest de la Tunisie (figure 1), est caractérisée par un bioclimat humide supérieur (Hasnaoui, 1992). La température moyenne annuelle est de l'ordre de 15,5 °C avec un maximum absolu de 43 °C au cours du mois d'août (Jdaidi, 2018) et un minimum autour de - 4 °C (Azizi, 2018). La pluviométrie moyenne annuelle est de 800 mm/an (Azizi, 2018). La zone étudiée renferme les forêts les plus denses et les plus riches en composition floristique, constituées par des peuplements purs de chêne-liège et de chêne zéen et sur le reste par des mélanges de chêne-liège et de chêne zéen. Il est possible de rencontrer également un mélange de chêne-liège et de pin maritime, *Pinus pinaster* (Jdaidi, 2018).



**Figure 1.**  
Carte de répartition géographique du chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd.) en Tunisie et zone d'étude (Ain Sallem – Nord-Ouest de la Tunisie).  
Geographical distribution map of zea oak (*Quercus canariensis* Willd.) in Tunisia and study area (Ain Sallem - North West Tunisia).

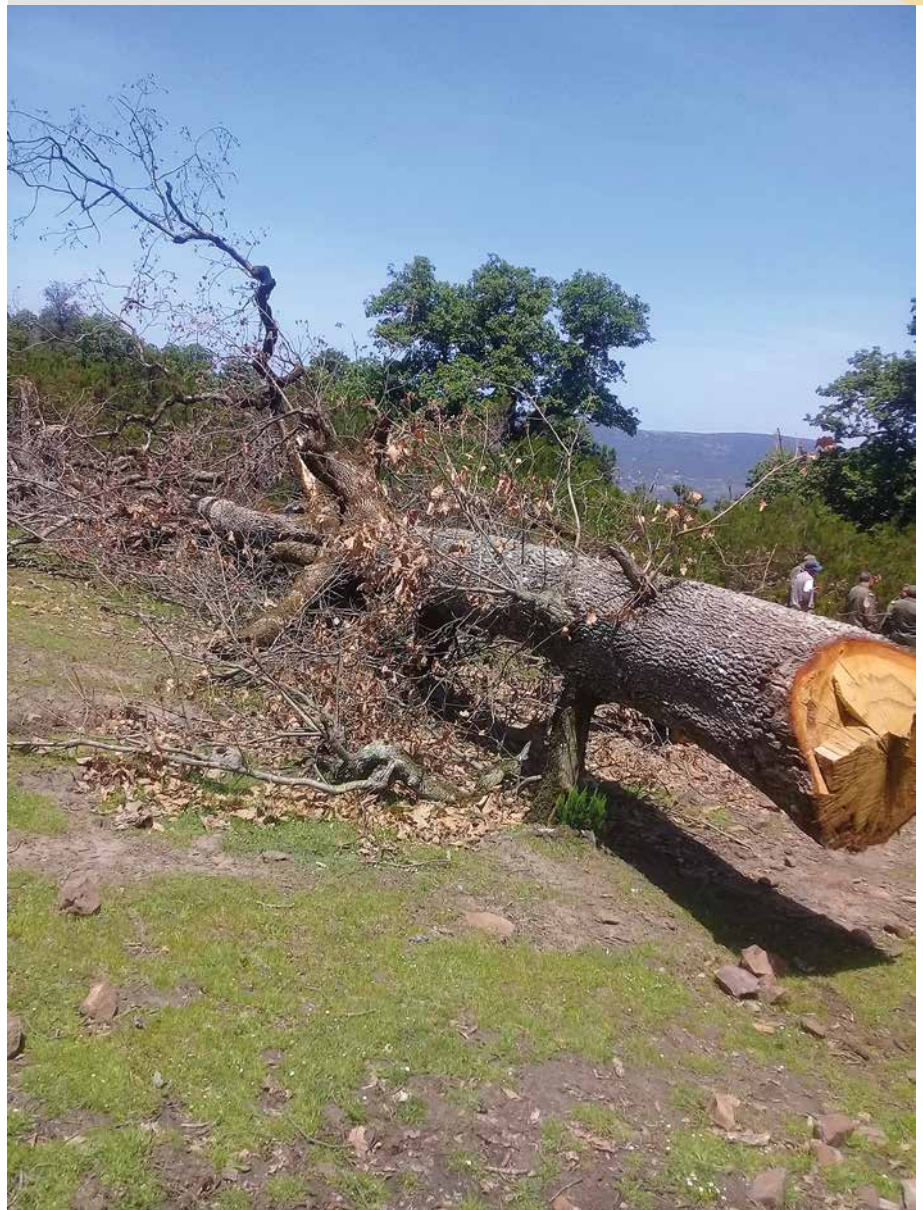


### Données collectées

Les 432 arbres de chêne zéen coupés ont été inventoriés et géoréférencés. Un premier passage de mesures dendrométriques sommaires a été effectué, par l'équipe de l'INRGREF, sur tous les arbres coupés. Ces mesures dendrométriques sommaires ont concerné le diamètre de la souche à 0,20 m de hauteur (DS), le diamètre à 1,30 m de hauteur (DHP) et la hauteur totale (H) de chaque arbre abattu. Afin d'établir des tarifs de cubage globaux et des tarifs marchands pour le chêne zéen en Tunisie, un échantillon représentatif de 75 arbres parmi ceux coupés a été sélectionné d'une façon plus ou moins proportionnelle au nombre d'arbres de chaque combinaison (classe de diamètre) x (classe de hauteur). Des taux d'échantillonnage un peu plus élevés ont été adoptés pour sélectionner les arbres des classes supérieures qui sont moins représentées. Un second passage de mesures dendrométriques détaillées a concerné les 75 arbres sélectionnés pour le cubage. Les mesures réalisées sur chacun des arbres sélectionnés ont porté sur les diamètres de la grume (tige principale) mesurés à 0,20 m et à 0,80 m de hauteur, puis à des intervalles de 0,5 m jusqu'à la découpe fin-bout de 0,7 cm de diamètre. Les branches de chaque arbre ont été dénombrées et numérotées. Le diamètre au niveau du point d'insertion de chaque branche avec la tige principale a été mesuré puis ceux de la même branche à 0,5 m d'intervalle jusqu'à la découpe fin-bout de 0,7 cm. Le volume de la grume (tige principale) et celui des branches de chaque arbre ont été calculés séparément selon la méthode des billons successifs (Rondeux, 1993). Le volume total bois fort de chaque arbre est égal à la somme du volume de sa tige principale et de celui de ses branches.

### Tarifs de cubage globaux

Les tarifs de cubage globaux correspondent aux tarifs bois fort (BF) des grumes (tige principale) et des arbres entiers (tige principale et branches). Deux tarifs de cubage à une et à deux entrées ont été ajustés pour chaque type de volume (grume ou arbre entier). Le tarif de cubage à une entrée, plus facile à utiliser, permet de prédire le volume total BF d'un arbre entier ou de sa grume en fonction de son DHP. Le tarif à deux entrées, généralement plus précis, utilise comme variables exogènes, pour estimer le volume BF d'un arbre ou de sa grume, le DHP et la hauteur totale (H) de l'arbre en question (Rondeux, 1993).



**Photo 2.**

Arbre de chêne zéen, *Quercus canariensis* Willd., coupé.  
Zea oak tree, *Quercus canariensis* Willd., cut.  
Photo T. Sghaier.

Les fonctions utilisées pour mettre en relation le volume d'un arbre ou de sa grume avec son DHP ou son DHP et sa hauteur H ont fait l'objet de plusieurs études sur diverses essences forestières (Thill et Palm, 1979 ; Palm, 1981 ; Vallet *et al.*, 2006 ; Tran-Ha *et al.*, 2007 ; Sghaier *et al.*, 2008, 2013 ; Goubi *et al.*, 2019).

Au total, 10 fonctions ont été testées pour la sélection des équations qui permettent de prédire le volume de la grume (tige principale) et le volume total d'un arbre *i*. Il s'agit des fonctions suivantes :

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

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

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

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

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

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

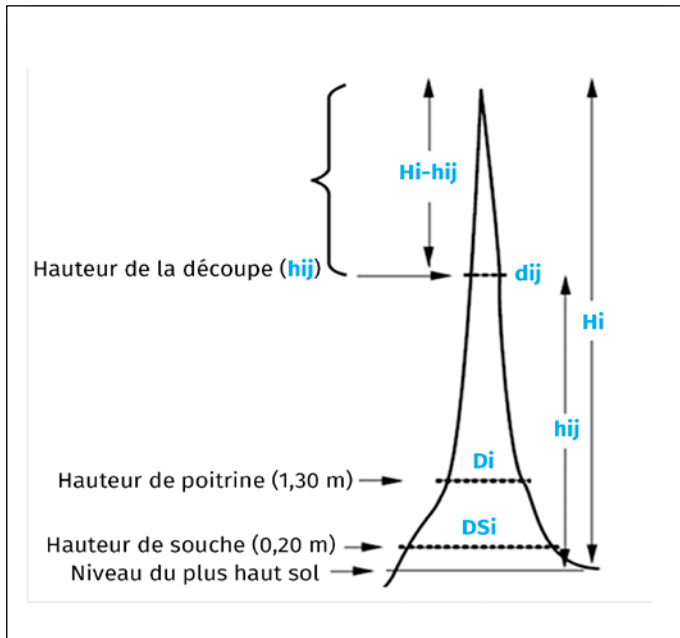
$$v_i = a_0 D_i^{a_1} H_i^{a_2} + \varepsilon_i \quad (\text{Eq.7})$$

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

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

$$v_i = \frac{\pi D_i^2 H_i}{4 \left(1 - \frac{1,3}{H_i}\right)} \left( a_0 + a_1 \frac{\sqrt{\pi D_i}}{H_i} + a_2 \frac{H_i}{\pi D_i} \right) + \varepsilon_i \quad (\text{Eq.10})$$

Les trois premières fonctions (Eq.1 à Eq.3) sont relatives aux tarifs à une entrée, tandis que les sept dernières (Eq.4 à Eq.10) sont relatives aux tarifs à deux entrées. 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). Les deux fonctions Eq.8 et Eq.9 ont été testées par Patricio *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. Lesdites fonctions ont été testées aussi pour le cubage du pin d'Alep dans les Aurès algériens par Goubi *et al.* (2019). La fonction Eq.10 a été utilisée par Deleuz *et al.* (2014) pour estimer le volume total d'un arbre, quelles que soient l'essence, la taille, la sylviculture ou la station.



**Figure 2.**

Schéma d'une tige (i) et désignation des variables associées aux tarifs de cubage des volumes marchands aux différentes découpes (j).  
Schematic of a stem (i) and designation of variables associated with cubing rates of merchantable volumes at different cuts (j).

Dans toutes ces équations,  $v_i$  représente le volume BF de la grume ou le volume total 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  $\sigma^2$ .

L'ajustement des différentes équations ou fonctions de cubage étudiées a été effectué à l'aide de la procédure REG du module SAS/STAT (SAS, 2004a) pour les fonctions linéaires (Eq.1, Eq.2, Eq.4 à Eq.6) ainsi que de la procédure MODEL du module SAS/ETS (SAS, 2004b) pour les fonctions non linéaires (Eq.3, Eq.7 à Eq.10).

### Tarifs de cubage à diamètre et longueur variables des grumes (tarifs marchands)

Le cubage des grumes (tige principale) des 75 arbres échantillons a été réalisé par la méthode des billons successifs (Rondeux, 1993). Étant donné la faible longueur des billons (0,5 m), ces derniers ont été assimilés à un cylindre dont la base et la hauteur correspondent respectivement au diamètre moyen (moyenne des diamètres 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 2 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 75 arbres échantillonnés ont donné naissance à 1 207 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 volume pour un arbre ( $i$ ) aux différentes découpes ( $j$ ) ont les formes suivantes :

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

Les variables  $D_i$  et  $H_i$  correspondent au DHP et la hauteur  $H$  de l'arbre  $i$ . Les équations qui décrivent ces deux rapports de volume sont nombreuses dans la littérature (Burkhart, 1977 ; Cao et Burkhart, 1980 ; Van Deusen *et al.*, 1981 ; Fonweban et Houllier, 1997 ; Tasissa *et al.*, 1997 ; Prigent *et al.*, 2001 ; Bullock et Burkhart, 2003 ; Barrio Anta *et al.*, 2007).

Afin de choisir les meilleures fonctions qui permettent de prédire les deux rapports de volume  $Rvd$  et  $Rvh$  des grumes de chêne zéen en Tunisie, les fonctions suivantes relatives au rapport  $Rvd$  (Eq.11 à Eq.13) et celles relatives au rapport  $Rvh$  (Eq.14 à Eq.16) ont été ajustées et comparées. Les fonctions Eq.11 à Eq.13 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 fonctions Eq.14 à Eq.16 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.11 et Eq.15 ont

été utilisées par Fonweban et Houllier (1997) pour *Eucalyptus saligna* au Cameroun, puis par Prégent *et al.* (2001) pour le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) au Québec. La fonction Eq.12 a été développée par Van Deusen *et al.* (1981) pour le pin à l'encens ou à torches (*Pinus taeda*) au sud des États-Unis, puis modifiée par Tasissa *et al.* (1997) pour la même espèce. La fonction Eq.13 a été développée par Burkhardt (1977) pour le pin à torches dans le sud des États-Unis. Finalement, la fonction Eq.14 a été élaborée par Cao et Burkhardt (1980) et la fonction Eq.16 par Bullock et Burkhardt (2003) toujours pour le pin à torches au sud des États-Unis. On peut vérifier que lorsque  $d_{ij} = 0$  ou  $h_{ij} = H_i$ , c'est-à-dire lorsqu'on considère l'arbre entier, les rapports de volume (Eq.11 à Eq.16) seront égaux à l'unité et les volumes cumulés  $vd_{ij}$  et  $vh_{ij}$  seront égaux au volume total  $v_i$ .

$$Rvd_{ij} = 1 + b_0 \left( \frac{d_{ij}}{D_i} \right)^{b_1} + \varepsilon_{ij} \quad (\text{Eq.11})$$

$$Rvd_{ij} = \exp \left( \frac{b_0 d_{ij}^{b_1}}{D_i^{b_2}} \right) + \varepsilon_{ij} \quad (\text{Eq.12})$$

$$Rvd_{ij} = 1 + b_0 \left( \frac{d_{ij}^{b_1}}{D_i^{b_2}} \right) + \varepsilon_{ij} \quad (\text{Eq.13})$$

$$Rvh_{ij} = 1 + b_0 \left( \frac{(H_i - h_{ij})^{b_1}}{H_i^{b_2}} \right) + \varepsilon_{ij} \quad (\text{Eq.14})$$

$$Rvh_{ij} = 1 + b_0 \left( \frac{H_i - h_{ij}}{H_i} \right)^{b_1} + \varepsilon_{ij} \quad (\text{Eq.15})$$

$$Rvh_{ij} = \exp \left( \frac{b_0 (H_i - h_{ij})^{b_1}}{H_i^{b_2}} \right) + \varepsilon_{ij} \quad (\text{Eq.16})$$

Les fonctions Eq.11 à Eq.16 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. Étant donné que les grumes des arbres ont été cubées par billons successifs de faible longueur fixe (0,5 m) jusqu'à la découpe fin-bout 7 cm de diamètre, les diamètres début (à la base) et fin (di1 et di2) 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 volume, la longueur et le volume des billons successifs dont les deux diamètres début et fin sont égaux (di2 = di1) ont été cumulés de manière à obtenir des billons de longueurs variables avec des diamètres di2 toujours inférieurs à di1.

Vu le caractère longitudinal des données utilisées pour l'ajustement des équations relatives aux rapports des volumes (Eq.11 à Eq.16), c'est-à-dire des données répétées sur les mêmes grumes (arbres), il existe une autocorrélation entre les résidus successifs d'une même grume. Pour contrôler cette autocorrélation et augmenter la précision des estimations des paramètres des fonctions ajustées, 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 des différentes fonctions étudiées (Diéguez-Aranda *et al.*, 2006). Il s'agit de la fonction « structure autorégressive d'erreurs successives » CAR(x) donnée par :

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

où :

- $e_{ij}$  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 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  $j^{\text{ième}}$

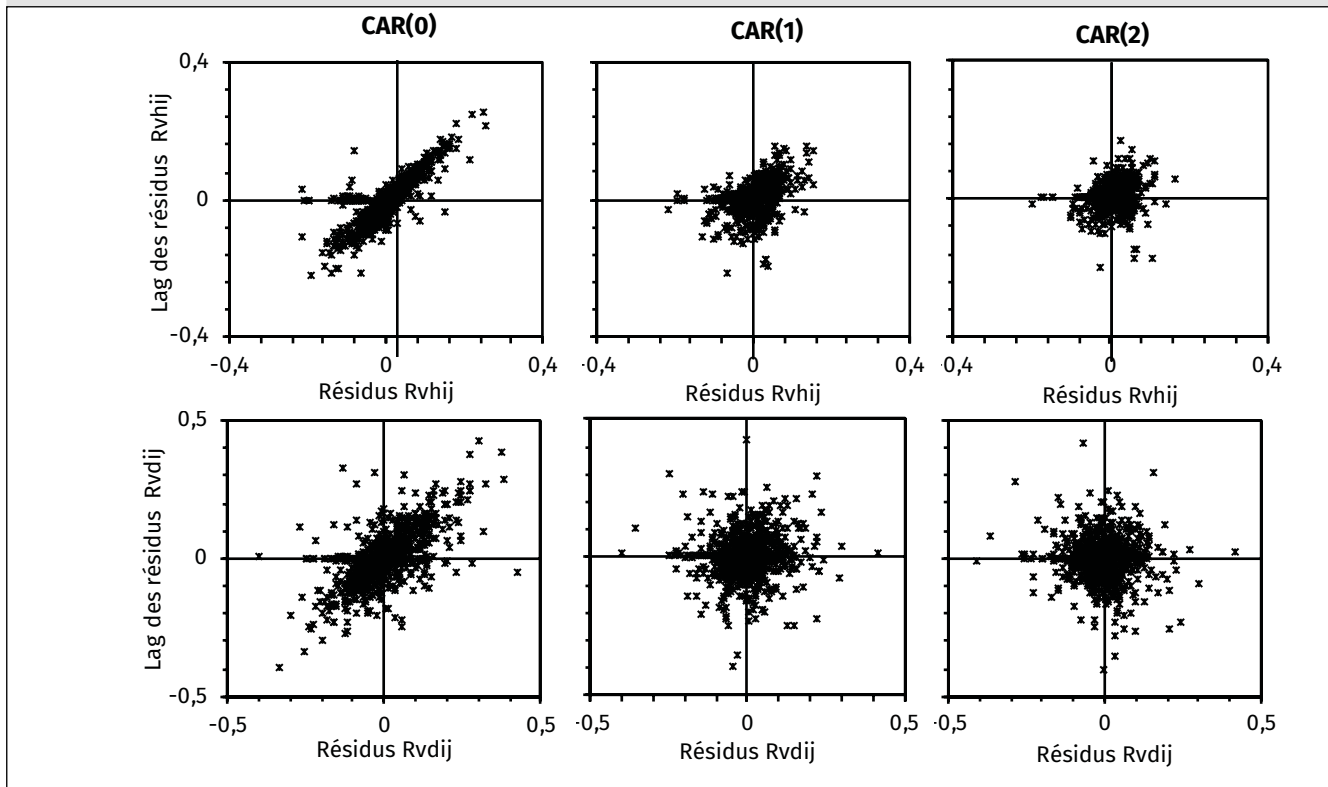
de la  $j^{\text{ième}} - n$  découpe de l'arbre  $i$ .

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.

La figure 3 relative à la projection de Lag des résidus des rapports de volume  $Rvh_{ij}$  et  $Rvd_{ij}$  du bois fort des grumes en fonction des mêmes résidus issus des fonctions Eq.12 ( $Rvd_{ij}$ ) et Eq.16 ( $Rvh_{ij}$ ) ajustées sans tenir compte de la structure autorégressive des erreurs (première colonne), et en utilisant la structure autorégressive des erreurs de premier et de second ordre (deuxième et troisième colonnes, respectivement), montre que la structure de second ordre CAR(2) sur les résidus permet un contrôle total de l'autocorrélation entre résidus successifs d'un même arbre. Ainsi, une structure autorégressive de second ordre sur les résidus a été incorporée dans le processus d'estimation des paramètres des différentes fonctions des rapports de volume.

L'ajustement individuel des fonctions Eq.11 à Eq.16 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.12 pour le premier rapport et Eq.16 pour le second. La figure 4 illustre, pour un arbre de caractéristiques dendrométriques moyennes de l'échantillon, les valeurs observées et celles estimées à l'aide des deux fonctions retenues (Eq.12 et Eq.16).

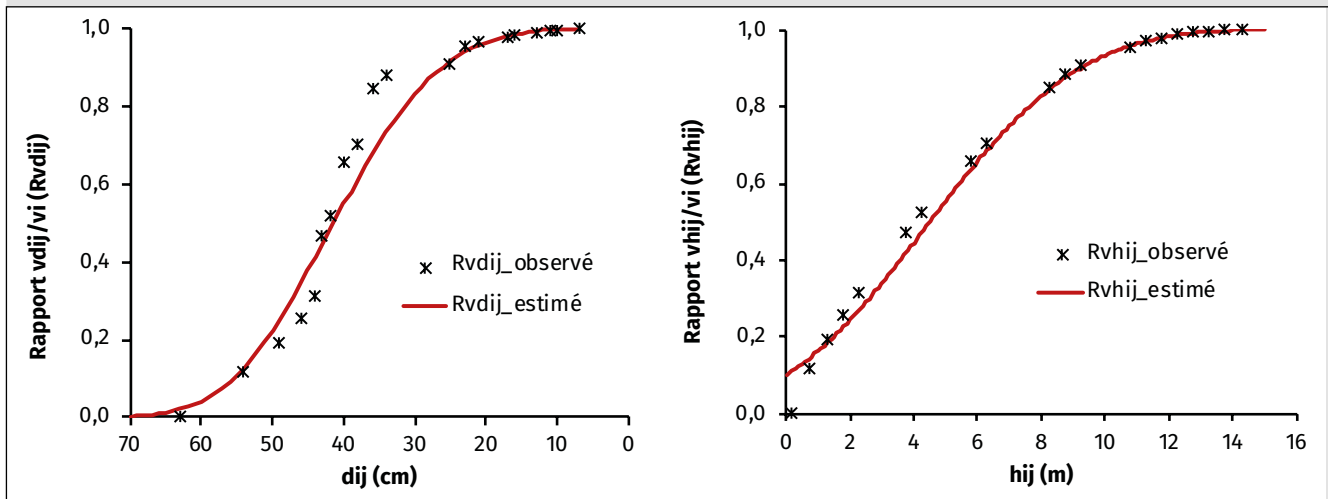
Les tarifs de cubage à diamètre et longueur variables des grumes des arbres de chêne zéen résultent de la combinaison de la fonction retenue pour la prédiction du volume total  $v_i$  du bois fort des grumes (Eq.9) et celles relatives à la prédiction des deux rapports du même volume cumulé à diamètre variable  $Rvd_{ij}$  (Eq.12) et à hauteur variable  $Rvh_{ij}$  (Eq.16). Ainsi, les deux fonctions des rapports de volume Eq.12 et Eq.16 combinées à la fonction Eq.9 relative au volume total du bois fort de la grume donnent 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) suivantes:



**Figure 3.**

Lag des résidus des rapports de volume à hauteur variable (Rvhij) et à diamètre variable (Rvdij) du bois fort des grumes d'arbres de chêne zéen, en fonction des résidus issus des fonctions Eq.12 (Rvdij) et Eq.16 (Rvhij) ajustées sans tenir compte de la structure autorégressive des erreurs (première colonne – CAR(0)), et en utilisant la structure autorégressive des erreurs de premier et de second ordre (deuxième : CAR(1) et troisième colonnes : CAR(2), respectivement).

Lag of the residuals of the variable height (Rvhij) and variable diameter (Rvdij) volume ratios of Zea oak logs as a function of the residuals from the functions Eq.12 (Rvdij) and Eq.16 (Rvhij) fitted without taking into account the autoregressive structure of the errors (first column - RAC(0)), and using the autoregressive structure of the errors of the first- and second-order (second: RAC(1) and the third column: RAC(2), respectively).



**Figure 4.**

Rapports de volumes observés et estimés pour un arbre échantillon (DS = 63 ; DHP = 49 cm ; H = 16,41 m ; HBF = 14,3 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 (DS = 63; DBH = 49 cm; H = 16.41 m; HBF = 14.3 m). DS: stump diameter; DBH: diameter at breast height; H: total height of the tree; HBF: height of strong wood.

$$Rvd_{ij} = \frac{vd_{ij}}{v_i} \Rightarrow vd_{ij} = a_0 D_i^{a_1} e^{(a_2 H_i)} \times \exp\left(\frac{b_0 d_{ij}^{b_1}}{D_i^{b_2}}\right) + \varepsilon_{ij}$$

(Eq.17)

$$Rvh_{ij} = \frac{vh_{ij}}{v_i} \Rightarrow vh_{ij} = a_0 D_i^{a_1} e^{(a_2 H_i)} \times \exp\left(\frac{b_3 (H_i - h_{ij})^{b_4}}{H_i^{b_5}}\right) + \varepsilon_i$$

(Eq.18)

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.17 et Eq.18 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, 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.19 et Eq.20 expriment ces deux relations :

$$d_{ij} = (b_3/b_0)^{1/b_1} D_i^{b_2/b_1} ((H_i - h_{ij})^{b_4/b_1} / H_i^{b_5/b_1}) + \varepsilon_i$$

(Eq.19)

$$h_{ij} = H_i - (b_0/b_3)^{1/b_4} (H_i)^{b_5/b_4} (d_{ij}^{b_1/b_4} / D_i^{b_2/b_4}) + \varepsilon_i$$

(Eq.20)

Pour estimer les paramètres des fonctions Eq.17, Eq.18, Eq.19 et Eq.20 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 :

$$S1: \begin{cases} d_{ij} = (b_3/b_0)^{1/b_1} D_i^{b_2/b_1} ((H_i - h_{ij})^{b_4/b_1} / H_i^{b_5/b_1}) + \varepsilon_d & \text{(Eq.19)} \\ h_{ij} = H_i - (b_0/b_3)^{1/b_4} (H_i)^{b_5/b_4} (d_{ij}^{b_1/b_4} / D_i^{b_2/b_4}) + \varepsilon_{h_{ij}} & \text{(Eq.20)} \\ vd_{ij} = (a_0 D_i^{a_1} e^{(a_2 H_i)}) \times \exp(b_0 d_{ij}^{b_1} / D_i^{b_2}) + \varepsilon_{vd_{ij}} & \text{(Eq.17)} \\ vh_{ij} = (a_0 D_i^{a_1} e^{(a_2 H_i)}) \times \exp(b_3 (H_i - h_{ij})^{b_4} / H_i^{b_5}) + \varepsilon_{vh_{ij}} & \text{(Eq.18)} \end{cases}$$

Pour résoudre le problème des dépendances entre les termes d'erreur des différentes équations du système S1, qui utilisent les mêmes variables indépendantes, la méthode d'ajustement utilisée est celle de régressions non linéaires sans corrélations apparentes (NSUR : *Nonlinear Seemingly Unrelated Regression equations*) basée sur les moindres carrés généralisés (Zheng *et al.*, 2015). Un modèle autorégressif du second ordre CAR(2) sur les résidus de chaque équation du système a été incorporé dans la procédure d'ajustement afin de résoudre le problème des autocorrélations entre résidus successifs issus des observations réalisées sur un même arbre. Afin d'obtenir la même estimation du volume total BF de la grume par l'utilisation du tarif global (Eq.9) ou les tarifs à diamètre et longueur variables des volumes cumulés  $vd_{ij}$  et  $vh_{ij}$  (Eq.17 et Eq.18), les valeurs ajustées des paramètres  $a_0$ ,  $a_1$  et  $a_2$  sont considérées comme fixes et sont égales à celles estimées pour la fonction Eq.9 dans le cas du volume de la grume (tableau III). Ainsi, seules les valeurs des paramètres  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$  et  $b_5$  sont à esti-

mer par le système S1 d'équations simultanées dont les variables dépendantes sont  $d_{ij}$ ,  $h_{ij}$ ,  $vd_{ij}$  et  $vh_{ij}$ .

### Critères de comparaison des fonctions ajustées

Différents critères statistiques basés sur des analyses numériques et graphiques des résidus ont été utilisés pour comparer les différentes équations ajustées (tarifs de cubage globaux et rapports de volume). Les analyses numériques ont concerné le biais qui correspond à la moyenne des résidus (valeurs observées – valeurs estimées), l'écart-type résiduel (RMSE), le coefficient de détermination  $R^2$  ajusté et le test de Ryan-Joiner (Ryan et Joiner, 1976) relatif à la normalité de la distribution des résidus. Les analyses graphiques ont concerné la présentation des quantiles normaux (*QQ-probability plots*) des résidus.

### Estimation des volumes totaux des arbres coupés et erreurs d'échantillonnage

Pour estimer les volumes totaux du bois des arbres coupés (volume des arbres entiers, volume des grumes et volume des branches), deux méthodes d'estimation ont été utilisées. Une première méthode basée sur la technique d'échantillonnage stratifié en considérant les classes de diamètre comme des strates, et une seconde méthode basée sur les modèles ajustés (tarifs de cubage globaux à une et à deux entrées et tarifs marchands).

### Estimation par échantillonnage stratifié

Pour une population de  $N$  arbres répartis en  $M$  strates (classes de diamètre) de taille  $N_i$  ( $i = 1, \dots, M$ ), un échantillon de taille  $n$  arbres répartis dans les  $M$  strates à raison de  $n_i$  arbres par strate est prélevé aléatoirement. On désigne par  $V_{ij}$  le volume mesuré du  $j^{\text{ème}}$  arbre ( $j = 1, \dots, n_i$ ) dans la  $i^{\text{ème}}$  strate. Le taux d'échantillonnage ou la fraction sondée pour la strate  $i$  est le suivant :

$$f_i = \frac{n_i}{N_i}$$

Les estimations de la moyenne, la variance de l'échantillon et la variance de la moyenne au niveau de la strate  $i$  sont comme suit (Cochran, 1977) :

$$\bar{v}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} v_{ij}, \quad \hat{\sigma}_i^2 = \frac{1}{n_i - 1} \sum_{j=1}^{n_i} (v_{ij} - \bar{v}_i)^2 \quad \text{et} \quad \hat{\sigma}_{\bar{v}_i}^2 = \frac{\hat{\sigma}_i^2}{n_i} (1 - f_i)$$

L'erreur standard de la moyenne au niveau de la strate  $i$  correspond à la racine carrée de la variance de la moyenne :

$$\hat{\sigma}_{\bar{v}_i} = \sqrt{\frac{\hat{\sigma}_i^2}{n_i} (1 - f_i)}$$

Le volume total et l'erreur standard du volume total des  $N_i$  arbres de la strate  $i$  sont :

$$\hat{V}_i = N_i \times \bar{v}_i \quad \text{et} \quad \hat{\sigma}_{V_i} = N_i \times \hat{\sigma}_{\bar{v}_i}$$

**Tableau I.**

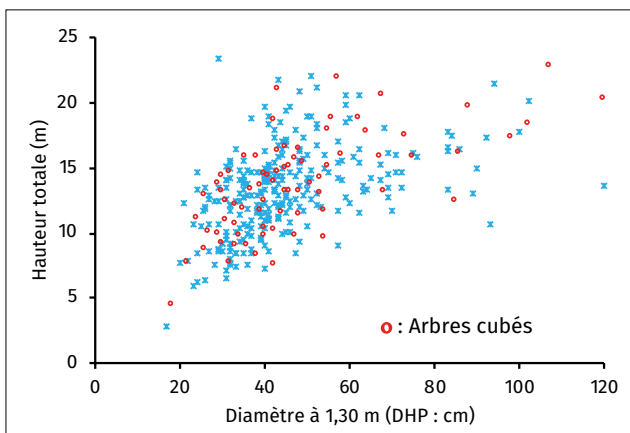
Répartition des 348 arbres de chêne zéen, *Quercus canariensis* Willd., coupés par classe de diamètre à hauteur de poitrine ou 1,30 m (DHP) et par classe de hauteur.  
Distribution of 348 trees of Zea oak, *Quercus canariensis* Willd., cut by diameter class at breast height or 1.30 m (DBH) and by height class.

Classe de DHP (cm)	Classe de hauteur totale (m)								Total	
	< 8	[8-10[	[10-12[	[12-14[	[14-16[	[16-18[	[18-20[	≥ 20		
< 30	9	7	8	10	1				1	36
[30-40[	7	26	19	25	20	1	1			99
[40-50[	2	7	22	26	37	16	7	3		120
[50-60[		2	4	8	13	4	7	4		42
[60-70[			1	7	7	3	3	2		23
[70-80[			1	1	4	3				9
[80-90[				3		5	1			9
≥ 90			1	1	1	2	1	4		10
<b>Total</b>	<b>18</b>	<b>42</b>	<b>56</b>	<b>81</b>	<b>83</b>	<b>34</b>	<b>20</b>	<b>14</b>		<b>348</b>

**Tableau II.**

Statistiques descriptives des variables dendrométriques mesurées des 75 arbres de chêne zéen, *Quercus canariensis* Willd., cubés.  
Descriptive statistics of measured dendrometric variables of 75 cubed trees of Zea oak, *Quercus canariensis* Willd.

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
Hauteur totale (H en m)	7,5	23,8	14,34	3,741
Hauteur bois fort (HBF en m)	5,8	22,8	13,01	3,724
Nombre de branches	0	50	10,65	9,195
Diamètre à 0,20 m (DS en cm)	30	144	60,24	22,755
Diamètre à 1,30 m (DHP en cm)	22	122	48,21	20,955
Volume des grumes (m <sup>3</sup> )	0,138	10,563	1,483	1,740
Volume des branches (m <sup>3</sup> )	0,000	4,718	0,475	0,782
Volume total (m <sup>3</sup> )	0,145	15,280	1,958	2,470

**Figure 5.**

Projection de la hauteur en fonction du diamètre à hauteur de poitrine (DHP) des 348 arbres coupés de chêne zéen dont celle de l'échantillon des 75 arbres cubés (points rouges).  
Projection of height versus diameter at breast height (DBH) of 348 cut Zea oak trees including the sample of 75 cubed trees (red points).

Le volume moyen estimé et l'erreur standard du volume moyen d'un arbre pour toute la population (N arbres) issus de l'échantillonnage stratifié se calculent comme suit :

$$\bar{v}_{st} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^M N_i \times \bar{v}_i \quad \text{et} \quad \hat{\sigma}_{\bar{v}_{st}} = \sqrt{\frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^M N_i^2 \frac{\hat{\sigma}_i^2}{n_i} (1 - f_i)}$$

Le volume total estimé ( $\hat{V}$ ) des N arbres de la population et l'erreur standard ( $\hat{\sigma}_{\hat{V}}$ ) du volume total sont les suivants :

$$\hat{V} = N \times \bar{v}_{st} \quad \text{et} \quad \hat{\sigma}_{\hat{V}} = N \times \hat{\sigma}_{\bar{v}_{st}}$$

L'erreur d'échantillonnage du volume total ( $\hat{V}$ ) des N arbres de la population qui correspond également au demi-intervalle de confiance du volume total estimé se calcule comme suit :

$$E = t_{1-\alpha/2} \hat{\sigma}_{\hat{V}_{st}}$$

où  $t_{1-\alpha/2}$  est une variable de Student avec n-1 degrés de liberté.

L'erreur d'échantillonnage E peut être exprimée en pourcent du volume total estimé :

$$E\% = \frac{E}{\hat{V}} \times 100$$

### Estimation par les modèles ajustés

Pour calculer l'erreur d'échantillonnage des estimations à partir d'un modèle (tarif de cubage) ajusté sur des données observées, on utilise l'écart-type résiduel (RMSE ou  $\hat{\sigma}_r$ ) issu de l'ajustement de ce modèle. Soit  $\hat{v}_i$  le volume du bois d'un arbre estimé à partir d'un tarif de cubage dont l'écart-type résiduel estimé est  $\hat{\sigma}_r$ , le volume moyen calculé à partir des volumes de N arbres estimés à l'aide de ce tarif et l'erreur standard de ce volume moyen se calculent comme suit (Rondeux, 1993) :

$$\bar{v} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{v}_i \quad \text{et} \quad \hat{\sigma}_{\bar{v}} = \frac{\hat{\sigma}_r}{\sqrt{N}}$$

Le volume total ( $\hat{V}$ ) des N arbres de la population estimé à l'aide du tarif de cubage et l'erreur standard ( $\hat{\sigma}_{\hat{V}}$ ) du volume total sont les suivants :

$$\hat{V} = \sum_{i=1}^N \hat{v}_i = N \times \bar{v} \quad \text{et} \quad \hat{\sigma}_{\hat{V}} = N \times \hat{\sigma}_{\bar{v}}$$

Les erreurs d'échantillonnage E et E% du volume total ( $\hat{V}$ ) des N arbres de la population se calculent comme précédemment (échantillonnage stratifié).

**Tableau III.**

Valeurs estimées, signification des paramètres et précision des fonctions retenues pour le cubage à une et à deux entrées des grumes et des arbres entiers de chêne zéen, *Quercus canariensis* Willd., en Tunisie.

*Estimated values, significance of parameters and accuracy of selected functions for single and double entry cubing of logs and whole trees of Zeus oak, Quercus canariensis Willd., in Tunisia.*

Partie de l'arbre	Type de tarif	Fonction	Par.	Estim.	ES	p >  t	Biais (m <sup>3</sup> )	RMSE (m <sup>3</sup> )	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>
Grume	Une entrée	Eq.3	a0	1,52E-4	3,4E-5	< 0,0001	- 0,009	0,302	0,966
			a1	2,3087	0,0505	< 0,0001			
	Deux entrées	Eq.9	a0	2,93E-4	2,6E-5	< 0,0001	- 0,006	0,253	0,976
			a1	2,0006	0,0665	< 0,0001			
Arbre entier	Une entrée	Eq.3	a0	1,17E-4	3,0E-5	0,0002	- 0,010	0,447	0,961
			a1	2,4349	0,0573	< 0,0001			
	Deux entrées	Eq.9	a0	2,75E-5	6,0E-5	< 0,0001	0,009	0,342	0,978
			a1	2,0347	0,0683	< 0,0001			
			a2	0,0478	6,71E-3	< 0,0001			
			a2	0,0478	6,71E-3	< 0,0001			

Par. : paramètre ; Estim. : estimation ; ES : erreur standard ; RMSE : racine de l'erreur quadratique moyenne.

**Tableau IV.**

Tables de cubage à une et à deux entrées des grumes d'arbres de chêne zéen (volumes en m<sup>3</sup>).  
*Single and double entry cubing tables for Zea oak logs (volumes in m<sup>3</sup>).*

Classe de DHP (cm)	DHP (cm)	Grumes Tarif à deux entrées CV% = 17,87										Tarif à une entrée CV% = 21,37
		Hauteur totale (m)										
		4 ≤ 5	6 5-7	8 7-9	10 9-11	12 11-13	14 13-15	16 15-17	18 17-19	20 19-21	22 21-23	
10-20	15	0,077	0,082	0,089	0,096	0,103	0,111	0,119	0,128	0,138	0,149	0,079
20-30	25	0,213	0,229	0,246	0,265	0,286	0,308	0,331	0,356	0,384	0,413	0,257
30-40	35	0,417	0,449	0,483	0,520	0,560	0,603	0,649	0,699	0,752	0,810	0,558
40-50	45	0,689	0,742	0,799	0,860	0,926	0,997	1,073	1,155	1,244	1,339	0,997
50-60	55	1,030	1,109	1,194	1,285	1,383	1,489	1,603	1,726	1,858	2,001	1,584
60-70	65	1,438	1,549	1,667	1,795	1,932	2,080	2,240	2,411	2,596	2,795	2,330
70-80	75	1,915	2,062	2,220	2,390	2,573	2,770	2,982	3,210	3,456	3,721	3,242
80-90	85	2,460	2,649	2,851	3,070	3,305	3,558	3,831	4,124	4,440	4,780	4,328
90-100	95	3,073	3,309	3,562	3,835	4,129	4,445	4,785	5,152	5,546	5,971	5,596
100-110	105	3,754	4,042	4,352	4,685	5,044	5,430	5,846	6,294	6,776	7,295	7,050
110-120	115	4,504	4,849	5,220	5,620	6,051	6,514	7,013	7,550	8,128	8,751	8,698
120-130	125	5,321	5,729	6,168	6,640	7,149	7,697	8,286	8,921	9,604	10,340	10,544
130-140	135	6,207	6,683	7,195	7,746	8,339	8,978	9,665	10,406	11,203	12,061	12,594
140-150	145	7,161	7,710	8,300	8,936	9,620	10,357	11,151	12,005	12,924	13,914	14,853

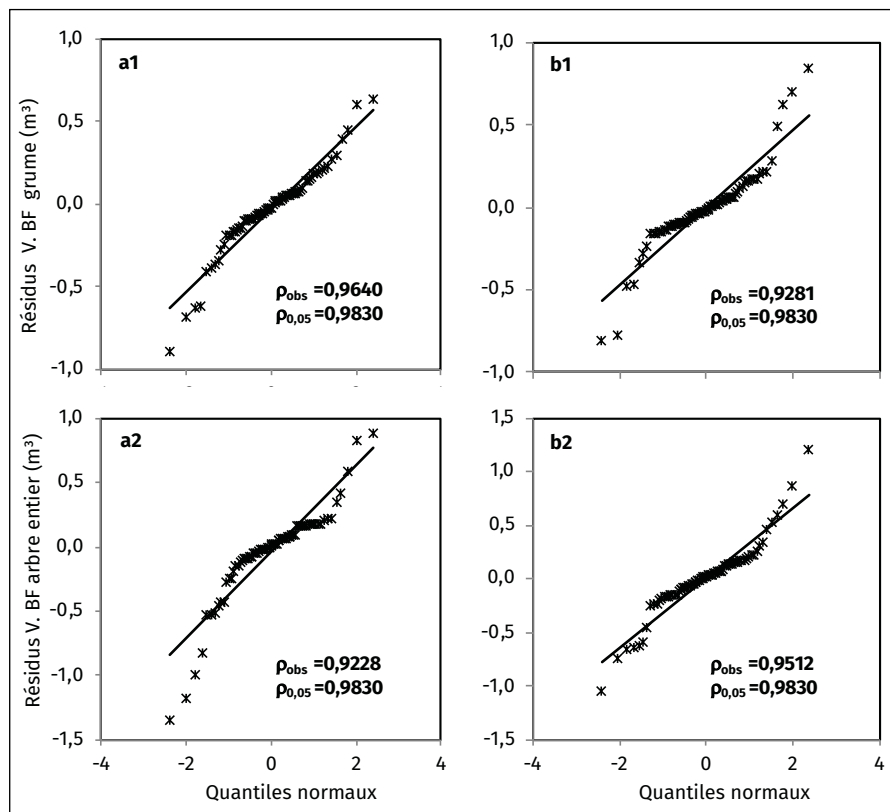
DHP : diamètre à hauteur de poitrine ou 1,30 m.

**Tableau V.**

Tables de cubage à une et à deux entrées des arbres entiers de chêne zéen (volumes en m<sup>3</sup>).  
Single and double entry cubing tables for whole trees of Zea oak (volumes in m<sup>3</sup>).

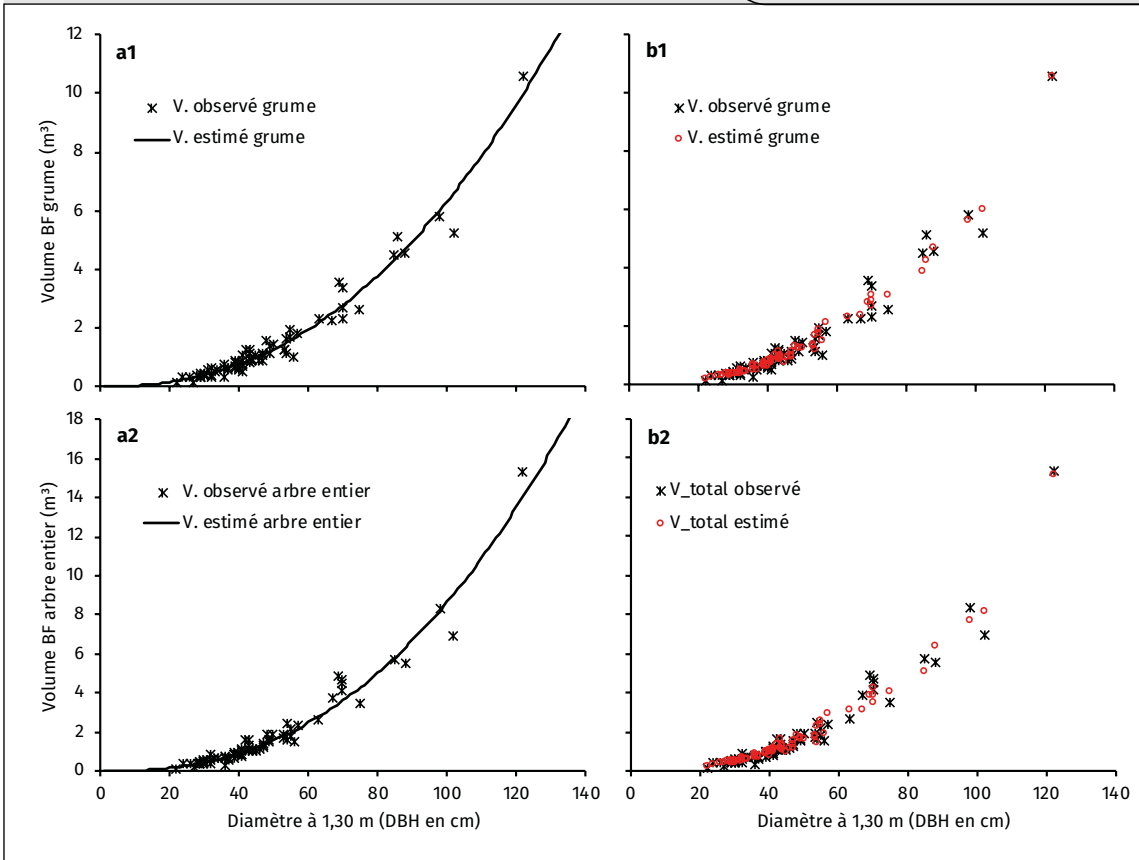
Classe de DHP (cm)	DHP (cm)	Arbres entiers Tarif à deux entrées CV% = 18,23										Tarif à une entrée CV% = 23,86
		Hauteur totale (m)										
		4 <= 5	6 5-7	8 7-9	10 9-11	12 11-13	14 13-15	16 15-17	18 17-19	20 19-21	22 21-23	
10-20	15	0,082	0,091	0,100	0,110	0,121	0,133	0,146	0,161	0,177	0,195	0,085
20-30	25	0,233	0,256	0,282	0,310	0,341	0,375	0,413	0,455	0,500	0,550	0,297
30-40	35	0,461	0,508	0,559	0,615	0,677	0,745	0,819	0,902	0,992	1,092	0,673
40-50	45	0,770	0,847	0,932	1,025	1,128	1,242	1,366	1,503	1,654	1,820	1,241
50-60	55	1,158	1,274	1,402	1,542	1,697	1,868	2,055	2,261	2,488	2,738	2,022
60-70	65	1,626	1,790	1,969	2,167	2,384	2,624	2,887	3,177	3,496	3,847	3,037
70-80	75	2,176	2,394	2,635	2,899	3,190	3,510	3,863	4,251	4,677	5,147	4,303
80-90	85	2,807	3,089	3,399	3,740	4,116	4,529	4,983	5,483	6,034	6,640	5,837
90-100	95	3,520	3,873	4,262	4,690	5,161	5,679	6,249	6,876	7,566	8,326	7,652
100-110	105	4,315	4,748	5,225	5,749	6,326	6,961	7,660	8,429	9,275	10,206	9,764
110-120	115	5,192	5,714	6,287	6,918	7,613	8,377	9,218	10,143	11,161	12,282	12,185
120-130	125	6,152	6,770	7,450	8,197	9,020	9,926	10,922	12,018	13,225	14,552	14,928
130-140	135	7,195	7,918	8,713	9,587	10,549	11,608	12,774	14,056	15,467	17,019	18,005
140-150	145	8,322	9,157	10,076	11,087	12,200	13,425	14,773	16,256	17,887	19,683	21,427

DHP : diamètre à hauteur de poitrine ou 1,30 m.

**Figure 6.**

Quantile-Quantile-probability plots et test de normalité (Ryan et Joiner, 1976) des résidus issus des tarifs de cubage à une entrée : Eq.3 (a1, a2) et à deux entrées : Eq.9 (b1, b2) des volumes totaux du bois fort (BF) des grumes et des arbres entiers de chêne zéen en Tunisie. Quantile-Quantile-probability plots and normality test (Ryan and Joiner, 1976) of residuals from single-entry: Eq.3 (a1, a2) and two-entry: Eq.9 (b1, b2) cubing rates of total volumes of Zea oak logs and whole trees in Tunisia.





**Figure 7.** Volumes observés et estimés à l'aide des tarifs de cubage à une entrée (a1 et a2) à l'aide de la fonction Eq.3 et à deux entrées (b1 et b2) à l'aide de la fonction Eq.9 : volumes totaux du bois fort des grumes et des arbres entiers de chêne zéen en Tunisie.  
*Observed and estimated volumes using single-entry (a1 and a2) cubing rates using Eq.3 and two-entry (b1 and b2) cubing rates using Eq.9: total hardwood volumes of Zean Oak logs and whole trees in Tunisia.*

## Résultats

### Caractérisation des arbres coupés et sélection d'un échantillon d'arbres à cuber

Selon l'inventaire exhaustif des arbres de chêne zéen coupés, 348 arbres entiers non encore abimés ont été recensés. Le tableau I présente la répartition par classe de DHP et par classe de hauteur totale des 348 arbres recensés.

La figure 5 montre la projection des 348 arbres disponibles en fonction de leur hauteur totale et de leur DHP dont celle des 75 arbres sélectionnés pour le cubage.

Les caractéristiques dendrométriques et les volumes des grumes, des branches et des arbres entiers des 75 tiges cubées figurent au tableau II.

### Tarifs de cubage globaux : bois fort des grumes et des arbres entiers de chêne zéen

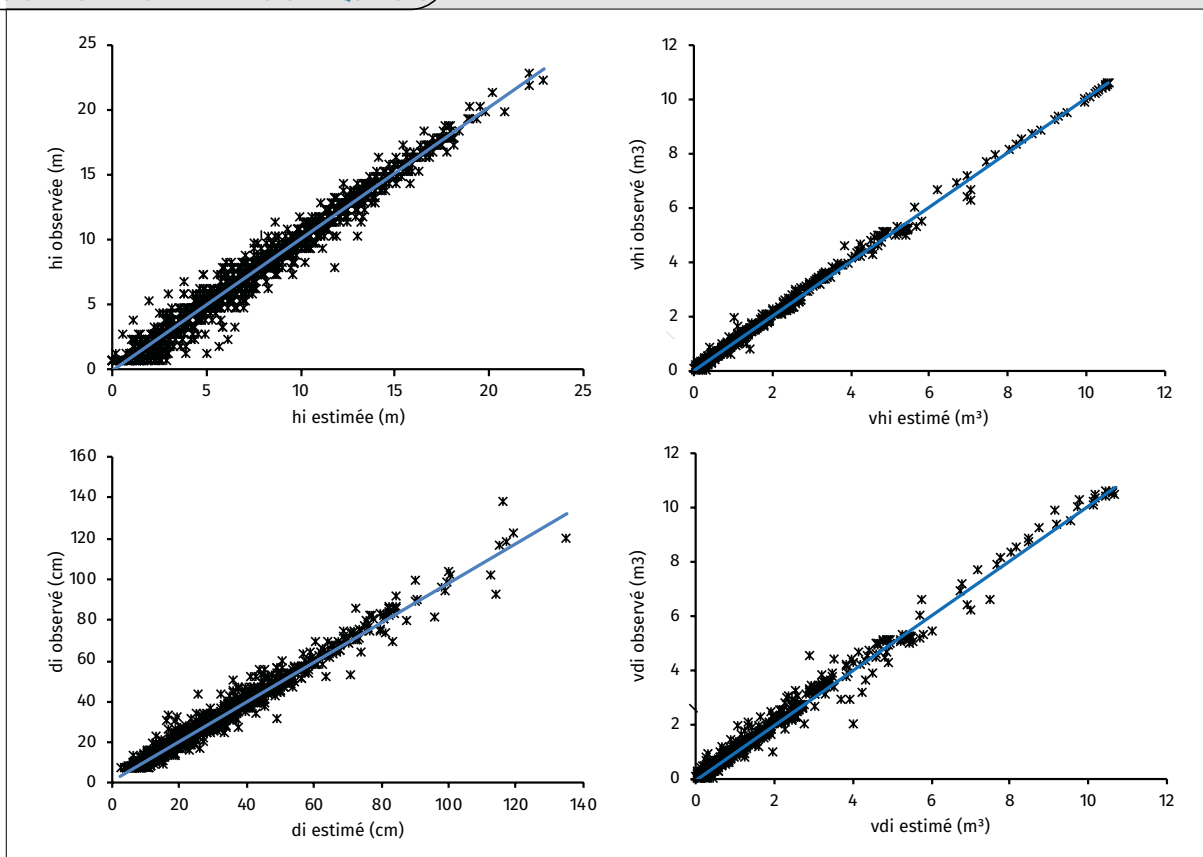
Les trois fonctions à une entrée (Eq.1 à Eq.3) et les six fonctions à deux entrées (Eq.4 à Eq.10) relatives aux tarifs de cubage globaux ont été ajustées sur les données issues des arbres cubés. Les mêmes fonctions ont été ajustées en

considérant une fois le volume total de l'arbre entier comme variable dépendante et une seconde fois en considérant le volume de la grume (tige principale sans tenir compte du volume des branches) comme variable dépendante. Sur la base des résultats obtenus (valeur et signification des paramètres) et des valeurs des différents critères de comparaison calculés (tableau III et figure 6), les deux fonctions Eq.3 (une entrée) et Eq.9 (deux entrées) ont été retenues pour la prédiction du volume BF des grumes et des arbres entiers de chêne zéen en Tunisie.

La projection des résidus issus des tarifs à une et à deux entrées retenue pour l'estimation du volume BF des grumes (figure 6 : a1 et a2) et de celui des arbres entiers (figure 6 : b1 et b2) en fonction des quantiles normaux montre que la distribution de ces résidus ne s'écarte pas trop loin d'une distribution normale.

La figure 7 présente la projection des valeurs observées issues des arbres cubés et celles estimées à l'aide des fonctions Eq.3 (tarifs à une entrée) et Eq.9 (tarifs à deux entrées) retenues pour l'estimation du volume BF des grumes et des arbres entiers.

Les tableaux IV et V présentent les tables de cubage à une et à deux entrées relatives aux volumes BF des



**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. La droite bleue représente la droite de régression linéaire simple des valeurs observées en fonction des valeurs estimées.

*Projection of observed values against estimated values using the different functions fitted by the simultaneous system of equations (S1) for variable diameter and length cubing rates. The blue line represents the simple linear regression line of the observed values against the estimated values.*

grumes et des arbres entiers de chêne zéen générées par les fonctions Eq.3 et Eq.9 pour des classes de 10 cm de diamètre et de 2 m de hauteur.

#### Tarifs de cubage à diamètre et longueur variables

Le tableau VI fait apparaître les valeurs et les tests de signification des paramètres estimés ( $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$  et  $b_5$ ) ; cependant, le tableau VII indique les précisions statistiques des différentes équations du système S1 ajusté (équations Eq.17 à Eq.20).

La figure 8 qui montre 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.

Comme pour les tarifs de cubage globaux, 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  $vh_{ij}$ ). Les valeurs des paramètres de ces équations étant celles qui figurent dans le tableau III (tarif global à deux entrées de la grume : Eq.9)

pour les paramètres  $a_0$ ,  $a_1$  et  $a_2$  et le tableau VI pour les paramètres  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$  et  $b_5$ . Deux cas de simulation sont possibles à l'aide 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 adopte 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 on calcule la différence entre les deux niveaux de mesure ( $h_{i2} - h_{i1}$  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 VIII, qui peut 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 10 cm 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 à la table 3 relative au volume total du bois fort de la grume (tarif à deux entrées cas des grumes).

L'algorithme ci-après résume la procédure de simulation des tables de cubage pour des diamètres fin-bout variables :

**Début :**

- entrer les caractéristiques dendrométriques de l'arbre  $i$ ,  $DS_i$ ,  $Di$ ,  $Hi$  ;
- entrer le diamètre fin-bout  $d_{ij}$  souhaité ;
- vérifier que  $DS_i > Di$  et  $d_{ij} \leq DS_i$ .
- Si  $d_{ij} \leq 7$  cm alors  $d_{ij} = 0$  ;
  - calculer :

$$h_{ij} = H_i - (b_0/b_3)^{1/b_4} (H_i)^{b_5/b_4} (d_{ij}^{b_1/b_4} / D_i^{b_2/b_4})$$

- Si  $h_{ij} \geq 10$  cm,
  - calculer : le volume jusqu'à  $h_{ij}$  :

$$vh_{ij} = (a_0 D_i^{a_1} e^{(a_2 H_i)}) \times \exp(b_3 (H_i - h_{ij})^{b_4} / H_i^{b_5})$$

- ou le volume jusqu'à  $d_{ij}$  :

$$vd_{ij} = (a_0 D_i^{a_1} e^{(a_2 H_i)}) \times \exp(b_0 d_{ij}^{b_1} / D_i^{b_2})$$

- Si non :  $h_{ij} - v_{h_{ij}} = \ll * \gg$

**Fin.**

## Discussion

Les tarifs à une entrée retenus pour l'estimation du volume BF de la grume et de l'arbre entier de chêne zéen en Tunisie ont tous les deux la forme d'une fonction puissance (Eq.3) qui exprime le volume en fonction du DHP avec des précisions de l'ordre de 97 % pour la grume et 96 % pour l'arbre entier. La même fonction puissance a été utilisée pour élaborer des tarifs de cubage à une entrée pour le pin pignon (*P. halepensis*) en Tunisie avec une précision de 93 % (Sghaier et al., 2013) et pour les plantations de pin maritime (*P. pinaster*) dans la région de Tazekka au Maroc avec une précision de 94 % (Alaoui et al., 2011). Toutefois et bien que le volume d'un arbre augmente généralement avec le diamètre du tronc, mesuré à 1,30 m du sol, le choix de ce type de tarifs à une entrée, plus simples et plus rapides à utiliser, 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 encore de l'âge des arbres (Prégent et al., 2001 ; Deleuze et al., 2014). Ainsi, des tarifs de cubage plus précis, dits à deux entrées, qui utilisent comme variables indépendantes

**Tableau VI.**

Valeurs et tests de signification des estimations des paramètres du système S1 d'équations simultanées relatives aux tarifs de cubage à diamètre et longueur variables. *Values and significance tests of parameter estimates of the S1 system of simultaneous equations for variable diameter and length cubing rates.*

Paramètre	Estimation	ES	p >  t
b0	- 0,2055	0,0270	< 0,0001
b1	3,1706	0,0487	< 0,0001
b2	2,6823	0,0474	< 0,0001
b3	- 1,2171	0,1669	< 0,0001
b4	3,0470	0,0449	< 0,0001
b5	2,8569	0,0601	< 0,0001

ES : erreur standard.

pour estimer le volume BF d'un arbre le DHP et la hauteur totale de ce dernier ont été élaborés. Les deux tarifs à deux entrées, relatifs à l'estimation du volume BF des grumes et des arbres entiers du chêne zéen en Tunisie, proviennent de la fonction Eq.9 avec une précision de l'ordre de 98 % pour les deux tarifs (grume et arbre entier). La même fonction a été adoptée pour ajuster un tarif de cubage à deux entrées pour le pin d'Alep dans les Aurès algériens avec une précision de l'ordre de 98 % (Goubi et al., 2019) et pour les plantations de pin gris, *Pinus banksiana*, au Québec avec une précision de l'ordre de 99 % (Prégent et al., 2001). Du point de vue de l'utilisation, les tarifs à une entrée, moins précis mais plus faciles à mettre en œuvre, peuvent être utilisés en aménagement, tandis que les tarifs à deux entrées, plus précis et qui sont appelés également tarifs d'exploitation,

**Tableau VII.**

Précisions des tarifs de cubage à diamètre et longueur variables. *Precisions of cubing rates for variable diameter and length.*

Variable	Fonction	Paramètres	Biais	RMSE	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>
vdij (m <sup>3</sup> )	Eq.17	a0, a1, a2, b0, b1, b2	0,0136	0,1823	0,9878
vhij (m <sup>3</sup> )	Eq.18	a0, a1, a2, b3, b4, b5	0,0138	0,0997	0,9963
dij (cm)	Eq.19	b0, b1, b2, b3, b4, b5	0,2796	3,3170	0,9703
hij (m)	Eq.20	b0, b1, b2, b3, b4, b5	0,0453	0,8128	0,9702

RMSE : racine de l'erreur quadratique moyenne.

**Tableau VIII.**

Table de cubage : volumes marchands ( $m^3$ ) bois fort (BF) des grumes d'arbres de chêne zéen pour un diamètre fin-bout  $d_{ij} = 20$  cm. Longueur des grumes  $\geq 10$  cm.  
Cubage table: market volumes ( $m^3$ ) of strong wood (SW) logs of Zea oak trees for an end-to-end diameter  $d_{ij} = 20$  cm. Log length  $\geq 10$  cm.

Classe de DHP	DHP (cm)	hij (m)	Hauteur totale des arbres (m)									
			vhij ( $m^3$ )	4	6	8	10	12	14	16	18	20
10-20	15	hij	*	*	*	*	*	0,21	0,37	0,54	0,73	0,93
		vhij	*	*	*	*	*	0,016	0,017	0,019	0,020	0,022
20-30	25	hij	1,28	2,03	2,79	3,58	4,39	5,20	6,03	6,87	7,71	8,56
		vhij	0,131	0,141	0,152	0,163	0,176	0,189	0,204	0,219	0,236	0,254
30-40	35	hij	1,98	3,04	4,13	5,23	6,34	7,46	8,59	9,72	10,86	12,01
		vhij	0,343	0,369	0,397	0,427	0,460	0,495	0,533	0,574	0,618	0,666
40-50	45	hij	2,38	3,63	4,90	6,18	7,46	8,76	10,06	11,36	12,67	13,99
		vhij	0,624	0,672	0,723	0,779	0,838	0,903	0,972	1,046	1,126	1,213
50-60	55	hij	2,64	4,01	5,40	6,79	8,20	9,61	11,02	12,44	13,86	15,29
		vhij	0,972	1,047	1,127	1,213	1,306	1,406	1,514	1,630	1,755	1,889
60-70	65	hij	2,83	4,29	5,76	7,23	8,72	10,21	11,70	13,20	14,70	16,20
		vhij	1,388	1,494	1,608	1,732	1,864	2,007	2,161	2,326	2,504	2,696
70-80	75	hij	2,97	4,49	6,02	7,56	9,11	10,66	12,21	13,77	15,33	16,89
		vhij	1,870	2,013	2,167	2,333	2,512	2,705	2,912	3,135	3,375	3,633
80-90	85	hij	3,07	4,65	6,23	7,82	9,41	11,00	12,61	14,21	15,81	17,42
		vhij	2,420	2,605	2,805	3,020	3,251	3,500	3,768	4,056	4,367	4,702
90-100	95	hij	3,16	4,77	6,39	8,02	9,65	11,28	12,92	14,56	16,21	17,85
		vhij	3,037	3,270	3,520	3,790	4,080	4,393	4,729	5,092	5,482	5,901
100-110	105	hij	3,23	4,88	6,53	8,19	9,85	11,51	13,18	14,85	16,53	18,20
		vhij	3,723	4,008	4,315	4,645	5,001	5,384	5,796	6,240	6,718	7,233
110-120	115	hij	3,29	4,96	6,64	8,33	10,01	11,70	13,40	15,09	16,79	18,49
		vhij	4,476	4,819	5,188	5,585	6,013	6,474	6,969	7,503	8,078	8,697
120-130	125	hij	3,34	5,04	6,74	8,44	10,15	11,87	13,58	15,30	17,02	18,74
		vhij	5,297	5,703	6,140	6,610	7,116	7,662	8,248	8,880	9,560	10,292

DHP : diamètre à hauteur de poitrine ou 1,30 m.

peuvent l'être pour la vente du bois sur pied (Sghaier *et al.*, 2013).

Étant donné les besoins très variables en ce qui concerne la connaissance de la longueur et la grosseur des grumes à transformer par l'industrie, l'utilisation des tarifs traditionnels devient insuffisante. Ainsi, 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 », ont été développés pour le chêne zéen dans le cadre de cette étude. Des tarifs similaires ont été élaborés ces deux dernières décennies pour différentes espèces forestières (Prégent *et al.*, 2001 ; Crecente-Campo *et al.*, 2009 ; Heidarsson et Pukala, 2011 ; Burkhart et Tomé, 2012 ; Calama *et al.*, 2012 ; Hjelm, 2013 ; Özcelik et Göçeri, 2015 ; Sghaier *et al.*, 2015 ; Lumbres *et al.*, 2016 ; Doyog *et al.*, 2017 ; Özcelik et Crecente-Campo, 2016 ; Tang *et al.*, 2017 ; Shahzad *et al.*, 2021). Grâce à un

système d'équations simultanées, quatre équations permettant d'estimer le diamètre de la grume jusqu'à une hauteur donnée, la hauteur de la grume jusqu'à un diamètre fin-bout donné, le volume cumulé de la grume jusqu'à un diamètre donné et enfin le volume cumulé de la grume jusqu'à une hauteur donnée ont été ajustées avec des précisions de l'ordre de 99 % pour les deux premières et de 97 % pour les deux dernières. La précision du tarif à hauteur/longueur variable (99,6 %) est légèrement meilleure que celle à diamètre variable (98,8 %). Néanmoins, les précisions obtenues dans cette étude s'apparentent à celles obtenues par Fonweban et Houllier (1997) pour *Eucalyptus saligna* au Cameroun et par Prégent *et al.* (2001) pour les plantations de pin gris au Québec.

Pour illustrer les utilisations de ce système d'équations, nous avons choisi quelques arbres représentatifs mesurés dans la zénaie étudiée. Nous avons utilisé les quatre équations ajustées pour cette forêt pour l'estimation des différentes grandeurs de la grume (volume total et partiel, diamètre et lon-

gueur des billons). Le tableau IX contient les résultats de ces estimations qui concernent : le volume observé et le volume estimé de la grume jusqu'aux découpes 7 cm (découpe bois fort) ; les volumes jusqu'à différentes découpes de diamètre (Eq.17) ; les volumes jusqu'à différentes découpes en hauteur (Eq.18) ; le diamètre fin-bout pour une longueur de tige de 5 m (Eq.19) ; la longueur de la tige pour un diamètre fin-bout de 15 cm (Eq.20).

La figure 9 illustre la possibilité de prédire le profil des tiges avec la fonction de défilement ajustée (Eq.19).

La première valorisation pratique du système d'équations ajustées dans le cadre de cette étude a été sollicitée par l'administration forestière tunisienne. En effet, pour estimer la valeur du bois coupé avant de le mettre en vente par adjudication, l'administration forestière a demandé au comité scientifique de lui présenter des données chiffrées sur le volume total BF des arbres coupés ainsi que

les volumes et les caractéristiques (diamètre et longueur) des grumes qui peuvent intéresser les industriels du bois. Pour ce faire, les 348 arbres coupés ont été examinés arbre par arbre et leurs tiges principales ont été classées en deux catégories selon la qualité de bois, la forme de la tige et la présence ou l'absence des défauts qui affectent la qualité du bois, tels que l'attaque par des insectes xylophages, la pourriture du tronc, le nombre et le diamètre des nœuds par rapport à la longueur de la grume. Ainsi, une première catégorie de 301 arbres dont les tiges peuvent produire, en totalité ou en partie, du bois qui peut être valorisé par l'industrie a été identifiée. Les 47 arbres de la seconde catégorie, caractérisés par des tiges de mauvaise qualité de bois, seront utilisés pour le chauffage ou la production de charbon de bois. Les dimensions (diamètre et longueur) des billons qui peuvent donner un bois utile pour l'industrie ont été repérées et notées sur chacune des 301 tiges de la première catégorie.

Deux méthodes d'estimation des volumes totaux BF des grumes (tiges principales), des branches et des arbres entiers ont été utilisées (tableau X). Il s'agit d'une première estimation basée sur la technique d'échantillonnage strati-

**Tableau IX.**

Illustration des fonctionnalités du système d'équations pour sept arbres représentatifs de chêne zéen issus de la base de données étudiée : volumes observé et estimé de la tige ; volumes jusqu'à différentes découpes de diamètre (Eq.17) ; volumes jusqu'à différentes découpes en hauteur (Eq.18) ; diamètre fin-bout pour une longueur de tige de 5 m (Eq.19) ; longueur de la tige pour un diamètre fin-bout de 15 cm (Eq.20).  
*Illustration of the functionalities of the system of equations for seven representative Zea oak trees from the studied database: observed and estimated stem volumes; volumes up to different diameter cuts (Eq.17); volumes up to different height cuts (Eq.18); butt diameter for a stem length of 5 m (Eq.19); stem length for a butt diameter of 15 cm (Eq.20).*

N° arbre	DHP (cm)	H (m)	V <sub>obs</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>Est.</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>d15</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>d35</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>d15-35</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>h5</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>h10</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>h5-10</sub> (m <sup>3</sup> )	d <sub>h5</sub> (cm)	h <sub>d15</sub> (m)
108	122	22,8	10,563	10,144	10,116	9,737	0,379	3,596	6,939	3,343	96,99	20,25
112	70	17,3	2,308	2,725	2,692	2,272	0,419	1,300	2,343	1,043	54,50	14,09
187	67	15,3	2,264	2,319	2,287	1,890	0,397	1,257	2,139	0,882	49,47	12,32
126	57	19,8	1,814	1,981	1,939	1,445	0,494	0,818	1,540	0,722	48,45	15,43
122	41	14,3	0,726	0,837	0,794	0,390	0,404	0,486	0,794	0,309	31,46	10,00
12	36	12,4	0,612	0,601	0,559	0,204	0,355	0,400	0,593	0,193	25,72	8,18
20	30	11,3	0,480	0,401	0,356	0,069	0,287	0,290	0,400	0,110	20,54	6,76

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 ; DHP : diamètre à hauteur de poitrine ou 1,30 m.

tifié en considérant les classes de diamètre comme des strates, et d'une seconde estimation à l'aide des deux tarifs globaux de cubage à une et à deux entrées développés dans cette étude. Pour l'estimation par les tarifs de cubage globaux, le volume des branches est obtenu par différence entre le volume des arbres entiers et celui des grumes. Le tableau X montre que les volumes estimés et les précisions des estimations dépendent de la méthode de prédiction utilisée. Les volumes totaux estimés par la méthode d'échantillonnage stratifié dépassent d'environ 5 % et 3 % ceux estimés par le tarif à une entrée, 10 % et 7 % ceux estimés par le tarif à deux entrées, pour respectivement les arbres entiers et les grumes (tiges principales). Les erreurs relatives des estimations des volumes BF des arbres entiers et des grumes sont respectivement de l'ordre de 2,44 % et 2,29 % pour le tarif à deux entrées ; 3,06 % et 2,65 % pour le tarif à une entrée ; 9,45 % et 8,84 % pour l'échantillonnage stratifié. Les tarifs à deux

**Tableau X.**

Volumes bois fort des 348 arbres entiers de chêne zéen coupés illicitement, estimés selon trois méthodes : échantillonnage stratifié, tarif global à une entrée et tarif global à deux entrées.

*Timber volumes of 348 whole trees of Zea oak felled illegally, estimated by three methods: stratified sampling, single-entry block rate and two-entry block rate.*

Composantes de volume	Échantillonnage stratifié		Tarif à une entrée		Tarif à deux entrées	
	Volume BF (m <sup>3</sup> )	Erreur relative (%)	Volume BF (m <sup>3</sup> )	Erreur relative (%)	Volume BF (m <sup>3</sup> )	Erreur relative (%)
Grumes	441,701	8,84	424,727	2,65	411,509	2,29
Branches	133,197	17,3	120,768	-	110,904	-
Arbres entiers	574,894	9,45	545,495	3,06	522,413	2,44

BF : bois fort.

Les erreurs relatives des estimations des volumes BF des arbres entiers et des grumes sont respectivement de l'ordre de 2,44 % et 2,29 % pour le tarif à deux entrées ; 3,06 % et 2,65 % pour le tarif à une entrée ; 9,45 % et 8,84 % pour l'échantillonnage stratifié. Les tarifs à deux

**Tableau XI.**

Répartition par classe de DHP des volumes BF des grumes des 348 arbres entiers coupés estimés à l'aide du tarif global à deux entrées et des volumes et longueurs des billons formés par un bois de qualité estimés à l'aide des tarifs marchands.  
*Distribution by DBH class of the BF volumes of the logs of the 348 whole felled trees estimated using the global two-entry tariff and the volumes and length of the logs formed by quality timber estimated using the merchantable tariffs.*

Classe de DHP (cm)	Nombre de tiges	Volume BF des grumes (m <sup>3</sup> )	Caractéristiques des billons des grumes de qualité				
			Nombre de tiges	Longueur moyenne (m)	Longueur minimum (m)	Longueur maximum (m)	Volume (m <sup>3</sup> )
< 30	36	10,638	32	5,7	1,0	9,0	6,331
[30 ; 40[	99	54,289	95	6,9	2,0	12,0	36,368
[40 ; 50[	120	113,753	114	7,6	3,3	15,0	71,447
[50 ; 60[	42	64,412	36	7,9	4,0	14,0	34,593
[60 ; 70[	23	50,754	14	8,8	3,0	14,8	20,337
≥ 70	28	117,664	10	11	7,5	14,0	26,416
<b>Total</b>	<b>348</b>	<b>411,509</b>	<b>301</b>	<b>7,4*</b>	<b>1,0*</b>	<b>15,0*</b>	<b>195,492</b>

DHP : diamètre à hauteur de poitrine ou 1,30 m.  
\* : longueur moyenne, minimale et maximale de l'ensemble des 301 billons formés par un bois de qualité.

entrées donnent les estimations les plus précises, et pour cela on recommande leur utilisation lorsque les deux paramètres dendrométriques (DHP et H) des arbres à cuber sont disponibles.

Le tableau XI présente, par classe de diamètre, le nombre et le volume total estimés par le tarif à deux

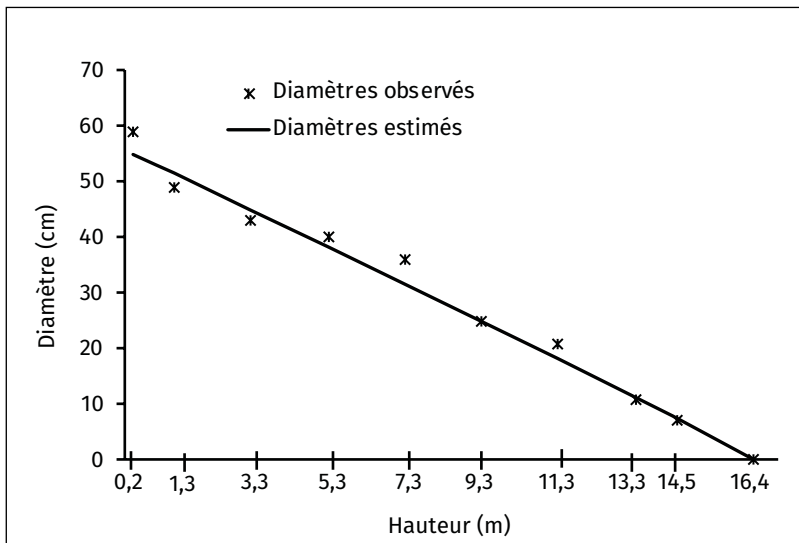
entrées du BF des grumes (Eq.9) des 348 arbres, ainsi que le nombre des grumes qui présentent un bois utile pour l'industrie du bois, les dimensions et le volume des billons de bois de qualité estimés à l'aide des tarifs marchands (Eq.17 à Eq.20).

## Conclusion

Les tarifs de cubage traditionnels permettent en général de prédire le volume total bois fort (BF) d'un arbre entier ou de sa tige principale en fonction de son diamètre à hauteur de poitrine (DHP) et de sa hauteur totale (H). En plus de ces paramètres, les tarifs de cubage élaborés dans le cadre de cette étude, grâce à un système d'équations simultanées, permettent de répondre à diverses exigences des utilisateurs de chêne zéen, *Quercus canariensis* Willd., en Tunisie. Ces tarifs marchands sont aptes à prédire le 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 exemples donnés illustrent ces possibilités. Les tarifs ajustés sont valables pour des tiges dont le DHP est situé entre environ 20 et 120 cm et dont la hauteur H se trouve entre environ 8 et 24 m.

## Remerciements

Les auteurs remercient vivement tous les techniciens de l'Institut national de recherches en génie rural, eaux et forêts (INRGRF), de la Régie

**Figure 9.**

Profil d'une tige de chêne zéen issue de la base de données étudiée (DHP = 46 cm ; H = 16,41 m ; HBF = 14,5 m) : comparaison entre observations et prédictions (équation Eq.19). DHP : diamètre à hauteur de poitrine ; H : hauteur totale de l'arbre ; HBF : hauteur bois fort. Profile of a Zean Oak stem from the studied database (DBH = 46 cm ; H = 16.41 m ; DBH = 14.5 m) : comparison between observations and predictions (equation Eq.19). DBH : diameter at breast height ; H : total height of the tree ; HBF : height of strong wood.



**Photos 3 et 4.**

Mesures dendrométriques et cubage d'un arbre de chêne zéen, *Quercus canariensis* Willd., coupé.  
*Dendrometric measurements and cubing of a cut Quercus canariensis* Willd. tree.  
Photos T. Sghaier.

d'exploitation forestière (REF) et de la Direction générale des forêts (DGF), ainsi que les agents de l'arrondissement forestier d'Ain Draham qui ont participé activement aux différents travaux de terrain (collecte de données, martelage et cubage des arbres coupés, etc.). Les auteurs remercient également les collègues H. Khachouri (REF), M. El Aieb (INRGREF), F. Aloui (ISPT) et N. Albouchi (CETIBA), qui ont contribué aux travaux de terrain par la classification du bois des grumes des arbres coupés selon la qualité.

#### **Financement**

Cette étude a été entièrement financée par les moyens propres de l'Institut national de recherches en génie rural, eaux et forêts (INRGREF), de la Direction générale des forêts (DGF) et de la Régie d'exploitation forestière (REF).

#### **Conditions d'accès aux données**

Les données de cette étude sont accessibles 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 Üniversitesi, Orman Fakültesi Dergisi / Journal of Forestry Faculty*, 11 (1): 68-84. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/159639>

Azizi T. G., 2018. Caractéristiques morphologiques et moléculaires en relation avec le milieu chez plusieurs variétés de cerisiers. Thèse de doctorat, Faculté des sciences de Tunis, 245 p. + annexes.

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://doi.org/10.5424/srf/2007161-00998>
- Bouchon J., 1974. Les tarifs de cubage. Nancy, France, Engref, 57 p. + annexes
- Boudy P., 1955. Économie forestière nord-africaine. Tome 4 : Description forestière de l'Algérie et de la Tunisie. Paris, France, Larose, 878 p.
- Bullock B. P., Burkhart 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://doi.org/10.1093/sjaf/27.3.153>
- Burkhart 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>
- Burkhart H. E., Tomé M., 2012. Tree Form and Stem Taper. In: Burkhart H. E., Tomé M. (eds). Modeling Forest Trees and Stands. Dordrecht, Netherlands, Springer, 9-41. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-3170-9\\_2](https://doi.org/10.1007/978-90-481-3170-9_2)
- Calama R., Sánchez-González M., Garchi S., Ammari Y., Cañellas I., Sghaier T., 2012. Towards the sustainable management of *Thuja (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., Burkhart H. E., 1980. Cubic-foot volume of loblolly pine to any height limit. Southern Journal of Applied Forestry, 4 (4): 166-168. <https://doi.org/10.1093/sjaf/4.4.166>
- Cochran W. G., 1977. Sampling techniques. 3rd ed. New York, USA, Wiley, 413 p.
- 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. <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 de l'ONF, 44 : 22-32. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01143797>
- DGF, 2010. Inventaire des forêts par télédétection – Résultats du deuxième inventaire forestier et pastoral national. Tunis, Tunisie, Ministère de la Défense nationale, Ministère de l'Agriculture, des Ressources hydrauliques et de la Pêche et Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche scientifique, 195 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. <https://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>
- 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>
- 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>
- Hasnaoui B., 1992. Chênaies du Nord de la Tunisie : écologie et régénération. Thèse de doctorat en sciences naturelles, Université de Provence Aix-Marseille I, France, 186 p.
- 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://ias.is/wp-content/uploads/Icelandic\\_Agricultural\\_Sciences\\_24\\_2011/Taper-functions-for-lodgepole-pine-Pinus-contorta.pdf](https://ias.is/wp-content/uploads/Icelandic_Agricultural_Sciences_24_2011/Taper-functions-for-lodgepole-pine-Pinus-contorta.pdf)
- 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>
- Jdaïd N., 2018. Structure des peuplements de la subéraie tunisienne : situation actuelle et devenir d'un écosystème. Institut sylvo-pastoral de Tabarka, Tunisie, 66 p. <https://www.memoireonline.com/06/12/5897/Structure-des-peuplements-de-la-suberaie-tunisiennesituation-actuelle-et-devenir-dun-eac.html>
- 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>
- Mazeghrane O., Messaoud N., 1990. Contribution à l'analyse dendrométrique d'un peuplement naturel de chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd.) dans la forêt expérimentale de Tizi Oufellah (Beni-Ghobri). Mémoire d'ingénieur agronomie, Université Mouloud Mammeri, Algérie, 54 p.
- Mechergui K., Jaouadi W., Ammari Y., 2022. Le chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd.) en Tunisie : Écologie, production, état de dégradation et les pratiques d'aménagement. Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires, 10 (1). [https://www.agrimaroc.org/index.php/Actes\\_IAPH2/article/view/1075](https://www.agrimaroc.org/index.php/Actes_IAPH2/article/view/1075)
- Özcelik 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 (1): 78-91. <https://doi.org/10.5849/forsci.14-212>
- Özcelik 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 (6): 851-863. <https://doi.org/10.3906/tar-1501-27>
- Palm R., 1981. Calcul et choix des équations de cubage d'arbres. Bulletin des Recherches Agronomiques de Gembloux, 16 (4) : 351-370.
- Pardé J., Bouchon J., 1988. Dendrométrie. Nancy, France, Engref, 328 p.
- Patrício M. S., Monteiro M. L., Tomé M., 2005. Biomass Equations for *Castanea sativa* High Forest in the Northwest of Portugal. In: Abreu C. G., Rosa E., Monteiro A. A. (eds). Proceedings of the IIIrd International Chestnut Congress. ISHS Acta Horticulturae 693. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.693.98>
- 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/documents/forets/connaissances/recherche/Memoire139.pdf>
- Quézel P., Médail F., 2003. Écologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen. Cachan, France, Lavoisier, 571 p.
- Rabhi K., 2011. Ajustement de modèles hauteur-circonférence-âge pour le chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd.) dans la forêt d'Akfadou (Tizi Ouzou) ; effet de la densité et de la station. Mémoire de magister en foresterie. Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 68 p. <https://www.semanticscholar.org/paper/Ajustement-de-mod%C3%A8les-hauteur-%E2%80%93-circonf%C3%A9rence-%E2%80%93-%C3%A2ge-Rabhi/ca10d4afcf37126d14f29a45fd2b02680b629e06>
- Rondeux J., 1993. La mesure des arbres et des peuplements forestiers. Gembloux, Belgique, 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](http://additive-net.de/de/component/jdownloads/send/70-support/236-normal-probability-plots-and-tests-for-normality-thomas-a-ryan-jr-bryan-l-joiner)

SAS Institute Inc., 2004a. SAS/STAT 9.1 Users's Guide. Cary, NC, USA, SAS Institute Inc.

SAS Institute Inc., 2004b. SAS/ETS 9.1 User's Guide. Cary, NC, USA, SAS Institute Inc.

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 (1): 79-88. <https://doi.org/10.3832/ifer1389-008>

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://search.emarefa.net/en/detail/BIM-356173-tables-de-cubage-pour-les-plantations-du-pin-pignan-pinus-pi>

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.academia.edu/34304033/ETUDE\\_ET\\_CHOIX\\_D\\_EQUATIONS\\_DE\\_CUBAGE\\_D\\_ARBRES\\_POUR\\_LE\\_PIN\\_D\\_ALEP\\_Pinus\\_halepensis\\_Mill\\_EN\\_TUNISIE](https://www.academia.edu/34304033/ETUDE_ET_CHOIX_D_EQUATIONS_DE_CUBAGE_D_ARBRES_POUR_LE_PIN_D_ALEP_Pinus_halepensis_Mill_EN_TUNISIE)

Shahzad M. K., Hussain A., Burkhart H. E., Li F., Jiang L., 2021. 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>

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.jstor.org/stable/44028277>

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*) 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 des Recherches Agronomiques de Gembloux*, 14 (3-4) : 267-284. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/117068>

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*, 59 (6) : 609-624. <https://dx.doi.org/10.4267/2042/16781>

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., Matvey T. G., 1981. A prediction system for cubic foot volume of loblolly pine applicable through much of its range. *Southern Journal of Applied Forestry*, 5 (4): 186-189. <https://doi.org/10.1093/sjaf/5.4.186>

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://doi.org/10.1007/s00468-014-1148-1>

### Sghaier et Ammari – Contribution des auteurs

Rôle du contributeur	Noms des auteurs
Conceptualisation	T. Sghaier, Y. Ammari
Gestion des données	T. Sghaier
Analyse formelle	T. Sghaier
Acquisition du financement	T. Sghaier, Y. Ammari
Enquête et investigation	T. Sghaier, Y. Ammari
Méthodologie	T. Sghaier
Gestion de projet	T. Sghaier, Y. Ammari
Ressources	• INNRGREF. • Ministère de l'Agriculture des Ressources hydrauliques et de la Pêche
Logiciels	T. Sghaier
Supervision	T. Sghaier, Y. Ammari
Validation	T. Sghaier
Visualisation	T. Sghaier
Écriture – Préparation de l'ébauche originale	T. Sghaier
Écriture – Révision et édition	T. Sghaier, Y. Ammari

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

# IRG54 - Sessions spéciales et numéro spécial sur les bois tropicaux : Chimie de la durabilité naturelle et conférée

La réunion IRG54 du Groupe international de recherche sur la protection du bois se tiendra du 28 mai au 1er juin 2023 à l'hôtel Pullman de Cairns, dans le Queensland en Australie.



## Session spéciale et numéro spécial

### Bois tropicaux : Durabilité naturelle et conférée

Animateur : Kévin Candelier (UR BioWooEB, Cirad, Montpellier Université)

Nous invitons les soumissions sur l'utilisation des espèces de bois tropicaux. Les sujets d'intérêt comprennent les mécanismes de défense extractifs contre les champignons, les insectes et les foreurs marins, la protection des bois tropicaux en service (y compris la modification et la conception), et la valorisation des bois tropicaux à faible durabilité naturelle.



Les auteurs des communications de cette session spéciale seront invités à soumettre leurs travaux pour publication dans un numéro spécial de la revue scientifique Bois et Forêts des Tropiques (<https://revues.cirad.fr/index.php/BFT/index>). Ce numéro spécial devrait être publié fin 2023 ou début 2024.

Un partenariat a été défini entre la revue [Bois et Forêts des Tropiques](#) et l'IRG54 pour valoriser les résultats présentés pour cette session spéciale.

## Information :

<https://www.irg-wp.com/IRG54/SpecialSessions.html>

# Variation in growth unit morphology in *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. (Meliaceae) and *Pterocarpus erinaceus* Poir. (Fabaceae) according to habitat and climate

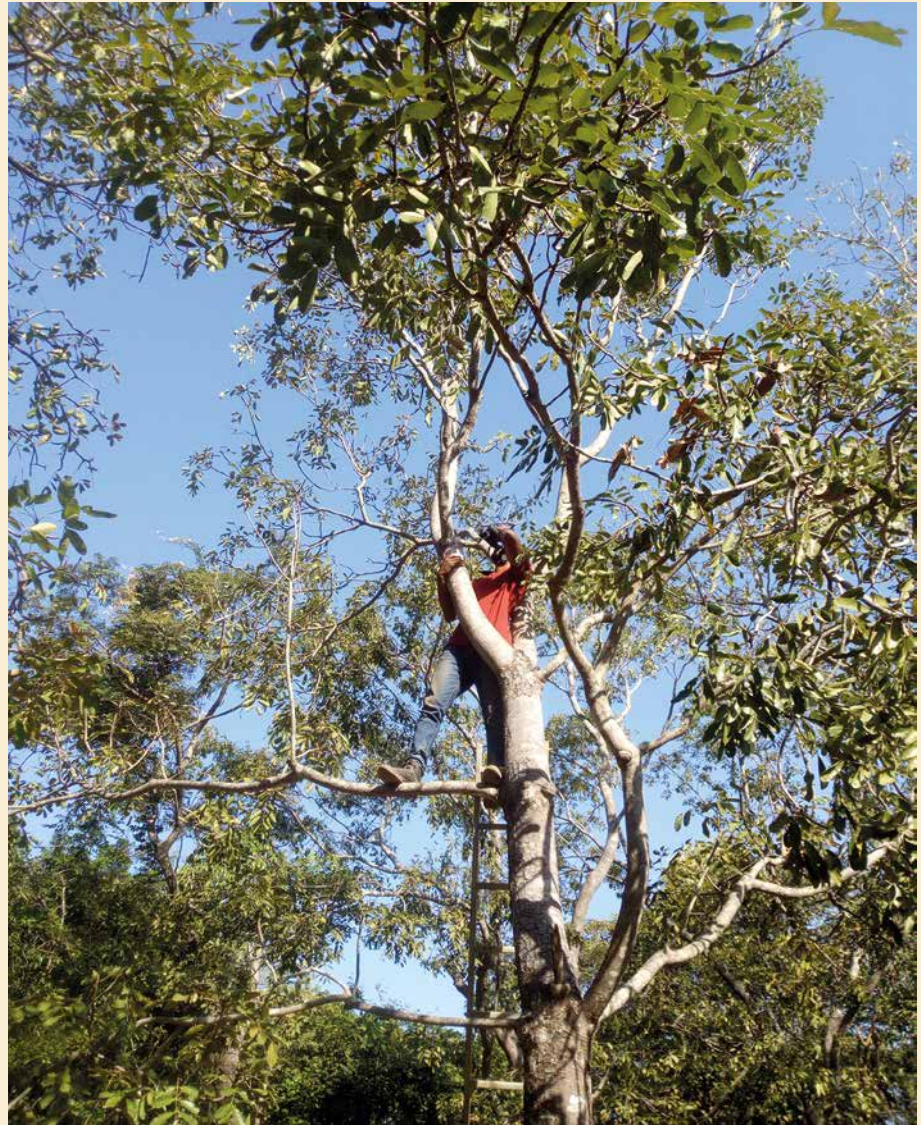
Beda Innocent ADJI<sup>1</sup>  
Doffou Sélastique AKAFFOU<sup>1</sup>  
Sylvie SABATIER<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université Jean Lorougnon Guédé  
UFR Agroforesterie  
BP 150, Daloa  
Côte d'Ivoire

<sup>2</sup> Cirad, UMR AMAP  
Université Montpellier II  
Cirad, CNRS, INRAE, IRD  
34398 Montpellier  
France

**Auteur correspondant /  
Corresponding author:**

Beda Innocent ADJI –  
[adjibedainnocent@gmail.com](mailto:adjibedainnocent@gmail.com) /  
[adj\\_i\\_beda@ujlg.edu.ci](mailto:adj_i_beda@ujlg.edu.ci)



**Photo 1.**

Fine counting of axes growth markers in the crown of a *Khaya senegalensis* tree using binoculars.  
Photo B. I. Adji.

**Doi :** 10.19182/bft2022.354.a36768 – Droit d'auteur © 2022, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 27 août 2021 ;  
date d'acceptation : 5 juillet 2022 ; date de publication : 1<sup>er</sup> décembre 2022.



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

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

Adji B. I., Akaffou D. S., Sabatier S., 2022. Variation in growth unit morphology in *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. (Meliaceae) and *Pterocarpus erinaceus* Poir. (Fabaceae) according to habitat and climate. Bois et Forêts des Tropiques, 354 : 41-54. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2022.354.a36768>

## RÉSUMÉ

**Variation de la morphologie des unités de croissance des essences *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. (Meliaceae) et *Pterocarpus erinaceus* Poir. (Fabaceae) selon l'habitat et le climat**

L'analyse rétrospective repose sur l'accès à des chronoséries longues sur la croissance permettant de comprendre et d'interpréter le fonctionnement structural des houppiers, comme l'exige la gestion durable des peuplements. L'objectif de cette étude était d'évaluer le développement et l'adaptation des houppiers de *Khaya senegalensis* et *Pterocarpus erinaceus* à un environnement changeant, afin de préparer l'établissement de parcelles permanentes. Les morphologies des unités de croissance (UC) des axes de 420 individus jeunes, adultes et âgés ont été analysées en plein soleil ou à l'ombre pendant la saison des pluies et la saison sèche dans sept sites en Côte d'Ivoire. Les résultats montrent que la morphologie de ces unités de croissance est un indicateur à la fois de l'expression du développement et des difficultés de développement des essences. L'hétérogénéité des habitats n'avait aucun effet significatif sur la morphologie des unités de croissance ( $P > 0,05$ ) des deux essences. La morphologie des UC varie d'un endroit (climat) à l'autre en raison des caractéristiques environnementales distinctes ( $P < 0,05$ ). La partie sud du gradient (Toumodi et Bouaké dans la région centrale du pays) offre des zones favorables et donc prioritaires pour les programmes de reboisement basés sur ces deux essences. L'âge des individus influence le nombre de phytomères par unité de croissance ( $P < 0,05$ ). Les individus jeunes (boutures) sont de bons idéotypes pour la sélection de génotypes suffisamment résistants. Quelle que soit l'essence, la saison des pluies augmente le taux de réussite de l'établissement des parcelles. Les unités de croissance des deux essences sont pratiquement de la même taille ( $P > 0,05$ ). Nos résultats pourraient servir de guide pour la prise de décision en vue de sélectionner des environnements appropriés pour la mise en œuvre de programmes de reboisement ou d'agroforesterie basés sur *K. senegalensis* et *P. erinaceus* et visant à conserver et à gérer durablement ces essences dans le contexte actuel de changement climatique.

**Mots-clés :** *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus*, environnement, morphologie, unité de croissance (UC), Côte d'Ivoire.

## ABSTRACT

**Variation in growth unit morphology in *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. (Meliaceae) and *Pterocarpus erinaceus* Poir. (Fabaceae) according to habitat and climate**

Retrospective analysis relies on access to long-term growth series to understand and interpret the structural functioning of tree crowns, as required for their sustainable management. The aim of this study was to assess the development and adaptation of crown shoots in *Khaya senegalensis* and *Pterocarpus erinaceus* to a changing environment, to prepare for the establishment of permanent plots. The growth unit (GU) morphologies of the axes of 420 young, adult and old individuals were analysed in full sunlight or shade during the rainy and dry season in seven locations in Côte d'Ivoire. The results show that the morphology of these growth units is an indicator of both development expression and developmental difficulties in tree species. Heterogeneous habitat had no significant effect on growth unit morphology ( $P > 0.05$ ) in either species. The morphology of the growth units varied from one location (climate) to another due to their distinct environmental characteristics ( $P < 0.05$ ). The southern part of the gradient (Toumodi and Bouaké in the central region of the country) offers favourable and hence priority areas for reforestation programmes based on the two species. The age of the individuals influenced the number of phytomers per growth unit ( $P < 0.05$ ). Young individuals (cuttings) are good ideotypes for the selection of suitably resistant genotypes. Whatever the species, the rainy season increased the success rate of plot establishment. The growth units of the two species are of practically the same size ( $P > 0.05$ ). Our results could be a guide to decisions for the selection of suitable environments for the implementation of reforestation or agroforestry programs based on *K. senegalensis* and *P. erinaceus* and aiming to conserve and sustainably manage these species in the current climate change context.

**Keywords:** *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus*, environment, morphology, Growth Unit (GU), Côte d'Ivoire.

## RESUMEN

**Variación de la morfología de la unidad de crecimiento en *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. (Meliaceae) y *Pterocarpus erinaceus* Poir. (Fabaceae) según el hábitat y el clima**

El análisis retrospectivo se basa en el acceso a series de crecimiento a largo plazo para comprender e interpretar el funcionamiento estructural de las copas de los árboles, tal y como se requiere para su gestión sostenible. El objetivo de este estudio era evaluar el desarrollo y la adaptación de los brotes de copa en *Khaya senegalensis* y *Pterocarpus erinaceus* a un entorno cambiante, para preparar el establecimiento de parcelas permanentes. Se analizaron las morfologías de las unidades de crecimiento (UC) de los ejes de 420 individuos jóvenes, adultos y viejos a plena luz solar o a la sombra durante la estación lluviosa y la estación seca en siete localidades de Costa de Marfil. Los resultados muestran que la morfología de estas unidades de crecimiento es un indicador tanto de la expresión del desarrollo como de las dificultades de desarrollo de las especies arbóreas. El hábitat heterogéneo no tuvo un efecto significativo en la morfología de la unidad de crecimiento ( $P > 0,05$ ) en ninguna de las especies. La morfología de las unidades de crecimiento varió de un lugar (clima) a otro debido a sus distintas características ambientales ( $P < 0,05$ ). La parte sur del gradiente (Toumodi y Bouaké, en la región central del país) ofrece zonas favorables y, por tanto, prioritarias para los programas de reforestación basados en ambas especies. La edad de los individuos influyó en el número de fitómeros por unidad de crecimiento ( $P < 0,05$ ). Los individuos jóvenes (esquejes) son buenos ideotipos para la selección de genotipos adecuadamente resistentes. Independientemente de la especie, la temporada de lluvias aumentó la tasa de éxito del establecimiento de las parcelas. Las unidades de crecimiento de las dos especies son prácticamente del mismo tamaño ( $P > 0,05$ ). Nuestros resultados podrían orientar en la toma de decisiones hacia la selección de entornos adecuados para implementar programas de reforestación o agroforestales basados en *K. senegalensis* y *P. erinaceus* que tengan como objetivo la conservación y gestión sostenible de estas especies en el contexto actual de cambio climático.

**Palabras clave:** *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus*, entorno, morfología, unidad de crecimiento (UC), Costa de Marfil.

## Introduction

Plant architectural retrospective analyses, which describes the historical growth strategy of tree's species (Barthélémy and Caraglio, 2007), has been used for the phenotypic description and diagnosis of tree condition in several studies (Rutishauser *et al.*, 2011; Nicolini *et al.*, 2012; Sabatier *et al.*, 2014). It has also been used in many countries to understand and detect the impact of climate on the growth phases, development difficulties and adaptation of trees to a changing environment (Chaubert-Pereira *et al.*, 2009; Taugourdeau *et al.*, 2011). Indeed, the interpretation of primary growth markers is often neglected, despite the fact that it provides long time series on the development of tree crowns, i.e., the conditions required for sustainable management (Nicolini *et al.*, 2012). Retrospective analysis provides a better understanding in the coordination of growth processes (elongation, thickening) in the crown, in the morphology and anatomy during the long-term development of trees and in the causes of observed variations (Nicolini and Caraglio, 1994; Nicolini *et al.*, 2012). Although retrospective analysis has been proven to be very effective in assisting foresters in the diagnosis of tree condition and sustainable management of many plant genetic resources in Europe and South America, it has not been frequently applied to native forest species in sub-Saharan Africa. Yet, data acquired through the use of such a methodology can help contributing to the conservation of forest genetic resources, and thus to the resilience of forest ecosystems.

In sub-Saharan Africa, biodiversity is threatened by unhealthy and environmentally unsustainable agriculture following deforestation (REDD+, 2017). Several multiple-use species are overexploited and are consequently threatened with extinction (Ake-Assi, 1999; Kouassi *et al.*, 2019). After sharply reducing tropical rainforests, these practices are now spreading to savannah areas (54% of the surface area of Côte d'Ivoire). Reforestation and agroforestry based on local species are the two solutions chosen by Ivorian decision-makers to restore forest cover and conserve the country's wood resources (Akaffou *et al.*, 2019; REDD+, 2020). *Pterocarpus erinaceus* Poir. and *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. are species highly appreciated by the populations of the savannah zones for the quality of their wood, their use as fodder, their ability to restore the soil (as leguminous plants) and their medicinal properties. Moreover, *P. erinaceus* is a CITES-listed endangered species as well as included in the IUCN Red List (CITES, 2016; Goba *et al.*, 2019; Dumenu, 2019; Issa *et al.*, 2017; Adji *et al.*, 2020, 2021b) due to their intensive exploitation. Including them in reforestation and agroforestry programmes is one solution for their preservation and sustainable use.

In the current context of climate change, the functioning of tree crowns, genomic and environmental signatures and the species adaptation mechanisms to a changing climate all need to be taken into account to ensure their sustainable management (Nicolini, 2000; Kushwaha *et al.*, 2010; Sabatier *et al.*, 2014). Applying the retrospective method to endangered species such as *K. senegalensis* and *P. erina-*

*ceus* will provide information on their difficulties in developing in a given environment, enable the selection of genotypes that are resistant or adapted to certain habitats, and of priority areas favourable for forest management or agroforestry programmes (Segla *et al.*, 2020; Adji *et al.*, 2021c).

The aim of this study was to use retrospective analysis to study the development of growth units of *K. senegalensis* and *P. erinaceus* as a function of habitat (full sun and shading) and cohorts of individuals (saplings, adult tree and old tree) in the rainy and dry seasons. In this aim different individuals of these two species were analysed across a North-South bioclimatic gradient in Côte d'Ivoire. This approach allowed to: (i) identify the development mode of the two species, their difficulties in developing and adapting to climate change; (ii) identify environments or locations conducive to their cultivation; (iii) identify resistant genotypes adapted to climate variations for use in more severe environments; (iv) assess the variability of shoots according to the size of the individuals and the optimal conditions for development, and (v) Identify and characterise architectural markers that can be used to optimise reforestation success (precision forestry). The latter could help to reduce dieback of stands based on these species, and lead to their conservation and sustainable management.

## Material and methods

### Plant material

Observations were made on the axes of 420 individuals per species of young (age: 1 to 5 year, height: 0.1 to 6 m, dbh: 1 to 9 cm for *K. senegalensis* and age: 1 to 5 years, height: 0.1 to 5 m, dbh: 1 to 9 cm for *P. erinaceus*), adult (age: 6 to 20 years, height: 7 to 20 m, dbh: 10 to 49 cm for *K. senegalensis* and age: 6 to 20 years, height: 10 to 15 m, dbh: 10 to 39 cm for *P. erinaceus*) and old trees (age:  $\geq 21$  years, height:  $\geq 21$  m, dbh:  $\geq 50$  cm for *K. senegalensis* and age:  $\geq 21$  years, height:  $\geq 16$  m, dbh:  $\geq 40$  cm for *P. erinaceus*) arbitrarily chosen in naturally regenerated individuals by species in shady undergrowth or crowded with other surrounding species and in the full sun or isolated (table I). Dendrometric characteristics and visual architectural appearance (physiological condition, decay, crown appreciation and visual aspect, ring colour, etc.) were used to estimate the age of trees and categorized them into the three development stages, i.e. young, adult and old ones. The number of individuals per type of habitat and per age category, as well as the types of axes assessed are detailed in table I.

### Study sites

The study took place in seven sites locations along a north-south bioclimatic gradient in Côte d'Ivoire (table II). These locations were chosen according to a decreasing gradient of vegetation density harbouring stands of *K. senegalensis* and *P. erinaceus* (figure 1).

**Table I.**

Dendrometric and age criteria, number of material and type of axis evaluated as a function of age and habitat in the two-target species.

	Development stage	Habitat/ environment	Tree height (m)			Tree diameter (cm)			N° of individ.	Axis examined
			Min	Max	Mean	Min	Max	Mean		
<i>Khaya senegalensis</i>	Young-tree (1-5 Yr) H (m): 0.1-6; D (cm): 1-9	Full sunlight	0.33	5.7	1.71 ± 0.29	0.52	9.74	3.54 ± 1.29	70	Main stem
		Shade	0.52	4.8	2.54 ± 0.15	1.18	8.85	5.39 ± 1.07	70	Main stem
	Adult-tree (6-20 Yr) H (m): 7-20; D (cm): 10-49	Full sunlight	7.5	17	14.09 ± 5.6	14.3	49.62	34.97 ± 4.01	70	Branch
		Shade	7.4	18.5	11.6 ± 6.18	12.3	45.92	29.08 ± 2.97	70	Branch
	Old-tree (≥21 Yr) H (m): ≥21; D (cm): ≥50	Full sunlight	21	37	31.46 ± 4.4	44	276.08	100.02 ± 57.	70	Branch
		Shade	20.5	34	28.76 ± 5.5	34.3	129.3	80.44 ± 34.8	70	Branch
<i>Pterocarpus erinaceus</i>	Young-tree (1-5 Yr) H (m): 0.1-5; D (cm): 1-9	Full sunlight	0.27	3.8	1.83 ± 0.51	0.38	9.59	3.21 ± 0.49	70	Main stem
		Shade	0.28	4.3	2.32 ± 0.59	0.54	9.20	3.93 ± 0.69	70	Main stem
	Adult-tree (6-20 Yr) H (m): 10-15; D (cm): 10-39	Full sunlight	10.1	15.6	12.18 ± 2.3	21.4	36.62	27.37 ± 4.93	70	Branch
		Shade	10.8	14.5	11.94 ± 3.1	14.2	38.1	24.6 ± 6.28	70	Branch
	Old-tree (≥21 Yr) H (m): ≥16; D (cm): ≥40	Full sunlight	16.5	19.5	17.78 ± 1.8	40.3	71.4	53.82 ± 12.1	70	Branch
		Shade	17	22	19.3 ± 3.2	41.7	63	50.51 ± 10.7	70	Branch

Yr = age in years; Tree-diam = diameter of tree or diameter of tree at breast height; Min = minimum; Max = maximum; m = meter; cm = centimetre; N° of indiv. = number individuals evaluated.

### Sampling

#### Choice of individuals

In each species and tree development stage (young, adult and old), 10 individuals were arbitrarily and randomly selected in open and closed areas in the seven above-mentioned locations (Ferké, Korhogo, Niakara, Katiola, Bouaké, Toumodi and Daloa) during the rainy season (optimal conditions) and the dry season (limiting conditions) (Nicolini and Caraglio, 1994). Thus, we obtained: 10 individuals \* 2 zones (Undergrowth/Shade and Full sun) \* 3 stages (young, adult and old) \* 7 localities = 420 individuals (table I). The development stages (young, adult and old) were chosen arbitrarily based on the height and diameter (dbh) of individuals grown in nurseries and from individuals present in former plots established by the National Center for Agronomic Research (CNRA) of Côte d'Ivoire in the 1980s, then by a field

survey questionnaire containing the approximate age of the sampled trees, submitted to the rural populations who owned the plots surveyed in the forest.

#### Choice of habitats

Although both species are heliophiles (tree savannah/open forest and grassy savannah species), two types of environments were considered: undergrowth and full sun. Individuals in the undergrowth lived in a very shady environment with a forest cover or in an overcrowded environment or benefited from more shelter. Individuals in the second category were growing isolated in full sun or in an open environment with direct access to sunlight.

#### Choice of axis types

Observations were made on different types of axis in two different habitats depending on the accessibility of the

**Table II.**  
 Characteristics of the locations surveyed.

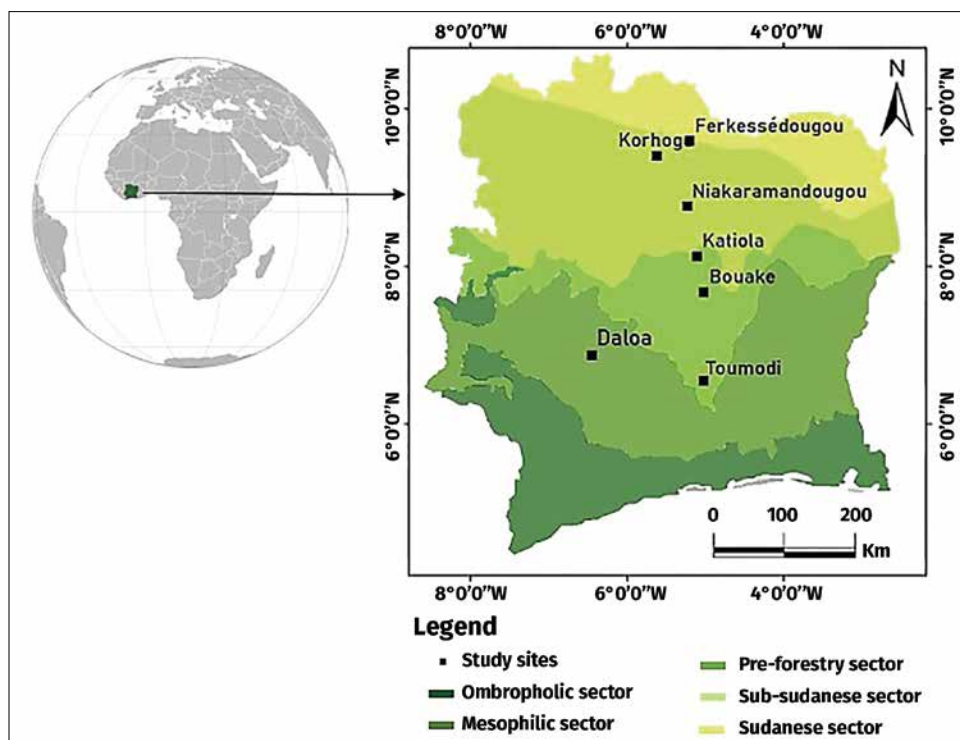
Sites/ locations	GPS coordinates	Vegetation	Climate	Temperature (°C)	Rainfall (mm/year)	Soil type
<b>Ferké</b>	5° 23' 43,39644" W; 9° 36' 1,87056" N	Grassy savannah	Dry tropical	27-40	263-1200	Ferralitic soils (Ferrisols, Cambisols, . Fluvisols, Luvisols), highly to moderately desaturated
<b>Korhogo</b>	5° 36' 12,39612" W; 9° 33' 24,68988" N	Open forest (wooded savannah)	Dry tropical	26,6- 35,7	817 - 1216	Ferruginous (90%) and Ferralitic (10%): superficial gravelly soil, deep gravel with a heavy texture, low in organic matter, highly desaturated
<b>Niakara</b>	5° 18' 40,73544" W; 8° 40' 47,97912" N	Wooded and grassy savannah	Dry tropical	24,7-38	800-1230	Complex of slightly desaturated ferrallitic soils and eutrophic brown tropical soils derived from basic rocks
<b>Katiola</b>	5° 7' 35,814" W; 8° 13' 53,94" N	Wooded and grassy savannah	Dry tropical	24-36	1100-1200	Moderately and highly desaturated ferrallitic soils
<b>Bouaké</b>	5° 5' 47,3289" W; 7° 40' 45,335" N	Clear forest (wooded savannah)	Wet tropical	23,6-34	1100-1200	Gravelly, moderately saturated, reworked, shallow ferralitic gravel from a granitic alteration material with a sandy-clay texture
<b>Toumodi</b>	5° 1' 34,95576" W; 6° 22' 42,67848" N	Open forest (wooded savannah, grassland and gallery forests)	Wet tropical	26,6-30	1092-1200	Ferralitic soil on granitic bedrock (sandy-clayey soil), characterised by the weak differentiation and friable consistency of their horizons
<b>Daloa</b>	6° 26' 9,19788" W; 6° 54' 32,058" N	Tropical rainforest	Wet tropical	21-34	1000 -1900	Ferralitic, deep, acidic and desaturated in exchangeable bases, rich in organic matter

°C = Celsius degree; mm = millimetre; W = west; N = north.

crowns. In young trees, the axes evaluated were the main trunks due to the ease of access and the rareness of secondary branches on all individuals in this category. In adult and old trees, the axes evaluated were branches, tertiary branches and short twigs depending on accessibility. Young trees were assessed on site; whereas the branches of adult and old trees were cut and transported back to the laboratory for assessment (Nicolini and Caraglio, 1994; Adji *et al.*, 2021a).

**Identification and observation of growth units**

The growth unit is defined based on morphological markers which result from the functioning of meristems and which remain unchanged for several years. These morphological



**Figure 1.**  
 Geographical location of the study area.

markers include the scars left by the scales of a bud, cataphylls and deciduous leaves, naturally pruned twigs, a bend in the axis at the site of apical necrosis or trauma, and the texture of the bark. The growth unit or elongation unit or morphological unit or extension unit (Hallé and Martin, 1968; Sabatier, 1999; Barthélémy and Caraglio, 2007; Millan, 2016) corresponding to all the organs initiated by the apical meristem during an uninterrupted organogenesis and elongation phase is delimited at its base by a large number of scars or pairs of scales (7 to 16) left by the terminal bud. This character can thus retrospectively enable identification of the successive growth units arranged along a leafy stem.

In general, two types of shoots are produced by the establishment of growth units by the terminal bud in temperate zones: monocyclic shoots (a single growth unit during one year or a wave of growth in spring) and polycyclic shoots (several growth units during one year or in growth waves in spring and summer) (Thiébaud, 1982; Nicolini and Caraglio, 1994; Barthélémy and Caraglio, 2007). The first growth unit (spring growth wave) is qualified as pre-formed (in the sense of Hallé *et al.*, 1978: presence of all the leaf organs of the future growth units in the bud before budburst), whereas other organs in the growth unit are qualified as neo-formed (simultaneous prolonged establishment of the leaf organs by the apical meristem after the pre-formed organs). In the tropics, the majority of shoots are polycyclic due to the rhythmicity adopted by the species in this zone (Hallé *et al.*, 1978; Hallé and Keller, 2019). This is the case for *K. senegalensis* and *P. erinaceus*. Retrospective analysis allows to recognise and date different structures (axes and GU) in the crown of a plant, to quantify the development by measuring shoot dimensions, to qualify the expression of certain architectural characteristics of a species, to identify areas of favourable development for a species, to evaluate the capacity of a species to adapt to a changing climate, to apprehend the effects of environmental factors on the regeneration of a species, etc.

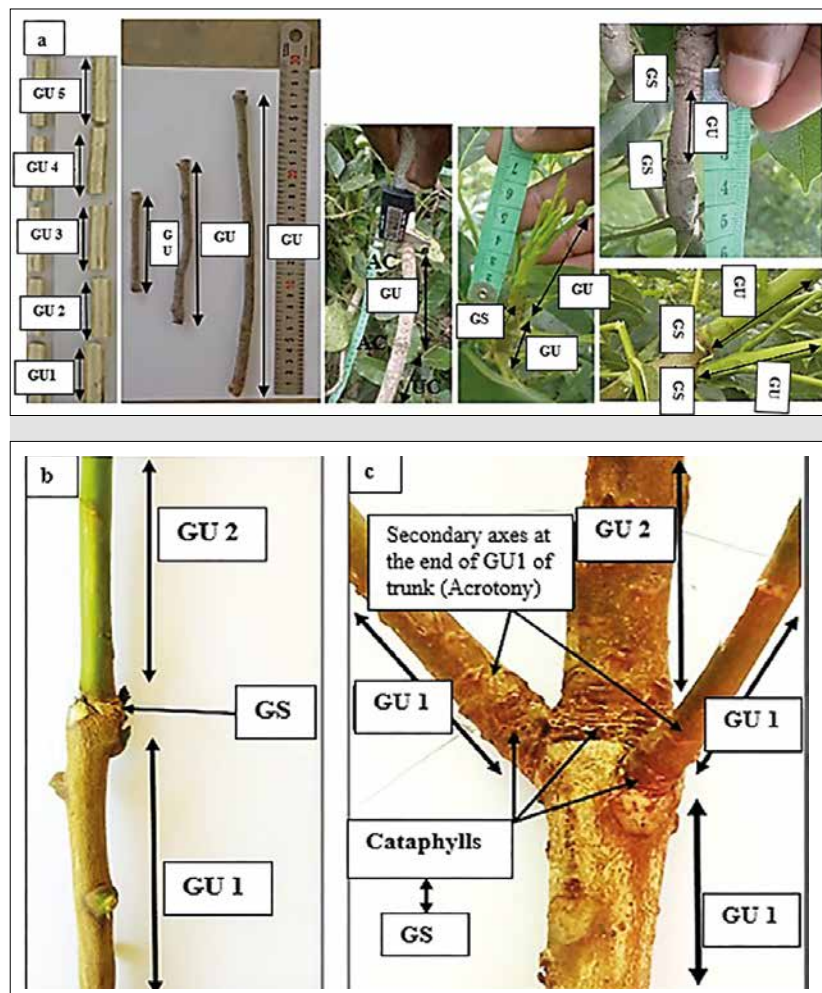
#### Parameters assessed

Retrospective analysis focused on the first four growth units starting from the apex of the sampled axis. The morphological parameters evaluated on each axis in each species were the total number of growth units in the axis, the length of each growth unit, the diameter at the beginning of the growth units, and the number of leaves or phytomers of the first four growth units (Nicolini *et al.*, 2012; Nicolini, 2000; Sabatier *et al.*, 1998; Godin and Caraglio, 1998). As a reminder, a phytomere is the

most fundamental unit of organisation of a plant, generally composed of an internode and a node with a leaf and an axillary bud. The harvested stems and branches were split longitudinally and transversally to identify growth stops (delimiting portions of the growth units) that are invisible on the bark of the axes. Data were collected during the rainy season (June and July 2020) and again from exactly the same individuals during the dry season (January and February 2021).

#### Statistical analysis

Statistical analyses were first performed using univariate descriptive statistics methods with XLSTAT 2020 version 7.5. The effect of habitat, location, age of individuals, season and species on the morphological parameters of the growth units was evaluated by a one-way analysis of variance (ANOVA) after square root normalisation of the data in order to maintain the database, to decrease the complexity of the comparison models and to reduce the cases of redundant data (double value and outliers) in SAS version 9.4. The homogeneity of variances was validated and the Student-Newman-Keuls test at the 5% threshold was used for post-hoc comparisons (GLM).



**Figure 2.**

a) Variation of the growth units (GU), b) Limit or growth stop (GS) of the growth units delimiting two physiological ages, c) Presence of cataphylls at the base of GUs, marking growth stop in *Khaya senegalensis*.



## Results

### Morphological description of the growth units (GUs)

#### *Khaya senegalensis*

Figure 2a shows variations in the size of the growth units along a foliar axis and the growth stops delimiting the portions of the growth units. figure 2b and 2c shows the growth stops (GS) between two (2) successive GUs along a leafy axis, identifiable by the cataphylls. figure 2b shows an axis consisting of two physiological ages (distinguished by colour change). These two physiological ages represent two successively formed GUs separated by an GS. The green age is the new GU, while the brown age represents the old GU. figure 2c shows cataphylls at the base of the GUs. This marks a cessation of meristem activity (GS) and the start of a new shoot (GU2).

All factors considered, in young trees of *K. senegalensis*, the number of growth units present on the observed axis ranged from 2 to 21 with an average of  $7.95 \pm 3.76$ ; the length of growth units varied from 5.8 to 67.8 cm with an average of  $23.46 \pm 12.03$  cm; the average diameter of the growth units ranged from 0.4 to 3.81 cm with an average of  $1.34 \pm 0.62$  cm; the number of phytomers carried by growth units in this cohort ranged from 7 to 38 with an average of  $16.32 \pm 5.87$ .

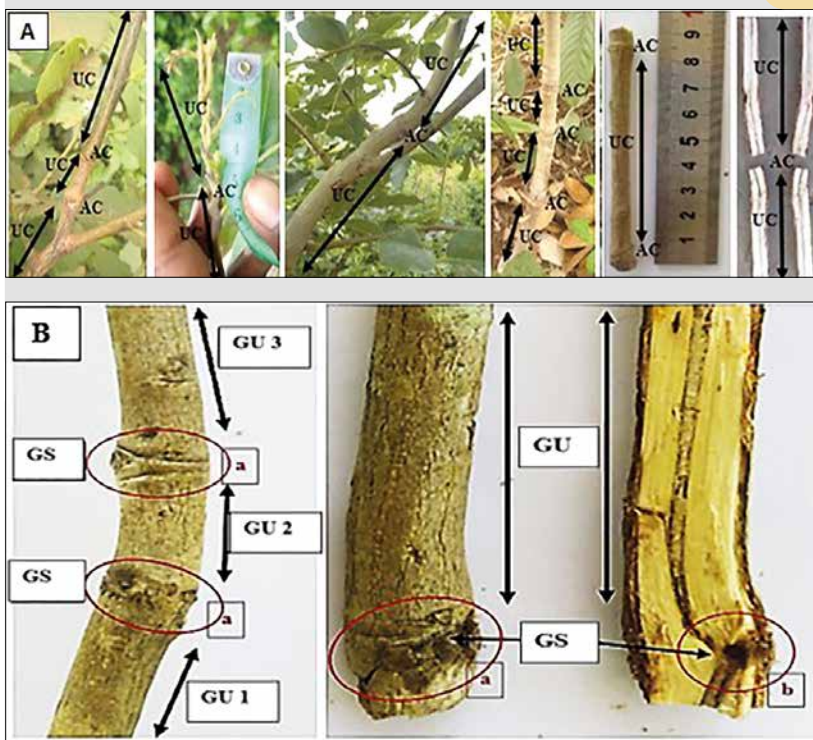
In adult *K. senegalensis* trees, the number of growth units on the assessed axes ranged from 5 to 14 with an average of  $8.25 \pm 1.94$ ; the length of the growth units in this cohort ranged from 5.15 to 31.77 cm with an average of  $17.38 \pm 6.38$  cm; the diameter of growth units ranged from 0.74 to 1.93 cm with an average of  $1.33 \pm 0.37$  cm and the number of phytomers counted per growth unit ranged from 10.5 to 29.5 with an average of  $17.75 \pm 4.53$ .

Finally, in old trees of *K. senegalensis*, the number of growth units present on the observed axis varied from 5 to 12 with an average of  $8.25 \pm 1.9$ ; the length of growth units varied from 6.2 to 38.85 cm with an average of  $18.02 \pm 6.2$  cm; the average diameter of the growth units varied from 0.74 to 2.04 cm with an average of  $1.37 \pm 0.33$  cm; the number of phytomers carried by growth units in this cohort varied from 13 to 33 with an average of  $19.78 \pm 4.67$ .

#### *Pterocarpus erinaceus*

Figure 3 shows the appearance of growth stops (GS), growth units (GUs) and variations in the size of the GUs along a leafy axis.

In *P. erinaceus* saplings, the number of growth units (GUs) present on the observed axis varied from 2 to 19 (average  $7.94 \pm 4.38$ ); the length of the GUs varied from 6.55 to 62.4 cm (average of  $21.67 \pm 9.84$  cm); the diameter of the GUs ranged



**Figure 3.** A) Morphology of the growth units (GU), B) Indicators of growth stop (GS) along an axis in *Pterocarpus erinaceus*: a) external scars, b) narrowing of the pith.

**Table III.**

Comparison of morphological growth units according to habitat type.

Species	Habitat	Axis-GU-n°	GU-length (cm)	GU-diam (cm)	GU-phyto-n°
<i>Khaya senegalensis</i>	Full sunlight	7.74 ± 0.3b	21.89 ± 1.91a	1.33 ± 0.06a	17.3 ± 0.59a
	Min-Max	2-21	5.15-67.8	0.4-3.81	7-38
	Shade	9.06 ± 0.55a	19.34 ± 1.15a	1.39 ± 0.06a	17.5 ± 0.73a
	Min-Max	4-18	5.8-40.45	0.69-2.13	9-26.75
	<b>Pr &gt; F</b>	<b>0.0379</b>	<b>0.2315</b>	<b>0.5950</b>	<b>0.8572</b>
<i>Pterocarpus erinaceus</i>	Full sunlight	7.51 ± 0.39b	22.81 ± 1.13a	1.11 ± 0.06a	15.08 ± 0.64b
	Min-Max	2-17	6.55-62.4	0.32-3.11	4.5-31.5
	Shade	8.82 ± 0.54a	21.94 ± 1.01a	1.26 ± 0.18a	17.84 ± 0.71a
	Min-Max	3-19	8.9-47.4	0.47-10.51	8-31.75
	<b>Pr &gt; F</b>	<b>0.0451</b>	<b>0.5871</b>	<b>0.3739</b>	<b>0.0056</b>

Values with the same letters are not statistically different at the 5% threshold (SNK). Full sunlight = open and sunny environment; Shade = crowded environment or under forest cover; Axis-GU-n° = number of growth units per axis measured; GU-length = mean length of growth units in centimeters; GU-diam = mean diameter of growth units in centimeters; GU-phyto-n° = mean number of phytomers per growth unit; Min = minimum and Max = maximum.

**Table IV.**  
Variation in morphological parameters of the growth units according to the location.

Species	Locations	Axis-GU-n°	GU-length (cm)	GU-diam (cm)	GU-phyto-n°
<i>Khaya senegalensis</i>	Ferké	8.95 ± 0.5ab	16.68 ± 1.51c	1.44 ± 0.07b	15.77 ± 0.68b
	Min-Max	4-13	7.85-40.45	0.69-1.93	10.5-22
	Korhogo	9.13 ± 0.88bcd	18.75 ± 1.72c	1.39 ± 0.1b	17.64 ± 0.86ab
	Min-Max	5-21	5.15-46.07	0.74-2.88	9-26
	Niakara	8.39 ± 0.35bcd	18.09 ± 1.5c	1.21 ± 0.06b	20.46 ± 1.23a
	Min-Max	6-12	6.2-38.85	0.74-1.75	13-33
	Katiola	6.44 ± 0.87d	25.82 ± 2.87b	1.4 ± 0.1b	17.19 ± 1.17ab
	Min-Max	3-18	11.1-48.15	0.78-2.13	8-26.75
	Bouaké	10.64 ± 0.73a	29.68 ± 11.14a	1.91 ± 0.26a	15.89 ± 1.33b
	Min-Max	7-15	18.25-67.8	0.67-3.81	7-22.75
	Toumodi	5.5 ± 0.38cd	19.65 ± 2.41c	1.07 ± 0.09b	14.44 ± 1.18b
	Min-Max	3-8	9.97-43	0.52-1.86	8.33-25
	Daloa	7.7 ± 0.69abc	24.35 ± 2.55b	1.21 ± 0.09b	19.07 ± 1.75a
	Min-Max	2-14	10.62-47.85	0.41-1.86	8.25-38
<b>Pr &gt; F</b>	<b>0.0001</b>	<b>0.0001</b>	<b>0.0001</b>	<b>0.0001</b>	
<i>Pterocarpus erinaceus</i>	Ferké	10.24 ± 0.94a	22.94 ± 1.49bc	1.19 ± 0.1ab	17.05 ± 1.07ab
	Min-Max	3-19	10.5-36.35	0.5-2.53	8-26
	Korhogo	8.5 ± 0.61ab	20.49-1.7bc	0.98 ± 0.06ab	15.62 ± 0.97b
	Min-Max	5-19	10.05-44.4	0.57-1.66	9-29
	Niakara	9.28 ± 0.62a	25.83 ± 1.74bc	1.25 ± 0.09ab	22.29 ± 1.02a
	Min-Max	4-14	17.2-44.08	0.69-2.27	16.5-31.75
	Katiola	7 ± 1.13c	20.56 ± 1.3bc	1.02 ± 0.08ab	15.09 ± 1.29c
	Min-Max	3-17	12.13-30.85	0.41-1.69	7-23
	Bouaké	8.21 ± 1.08ab	27.45 ± 4.08a	1.37 ± 0.19ab	16.09 ± 2.06c
	Min-Max	2-16	9.53-62.4	0.32-3.11	4.5-28.75
	Toumodi	8.35 ± 0.59ab	25.17 ± 2.12ab	1.8 ± 0.46a	16.39 ± 0.64b
	Min-Max	4-15	12.35-47.4	0.79-10.51	12.25-24
	Daloa	4.35 ± 0.39bc	15.83 ± 1.24c	0.61 ± 0.04b	10.42 ± 0.6c
	Min-Max	2-8	6.55-26.45	0.35-1.25	5.5-19.5
<b>Pr &gt; F</b>	<b>0.0001</b>	<b>0.0015</b>	<b>0.0166</b>	<b>0.0001</b>	

Values with the same letters are not statistically different at the 5% threshold (SNK). Axis-GU-n° = number of growth units per axis measured; GU-length = mean length of growth units in centimeters; GU-diam = mean diameter of growth units in centimeters; GU-phyto-n° = mean number of phytomers per growth unit; Min = minimum and Max = maximum.

from 0.32 to 3.11 cm (mean  $1.05 \pm 0.52$  cm); and the number of phytomers carried by GUs in this cohort ranged from 4.5 to 28.75 (mean  $15 \pm 5.74$ ). In adult *P. erinaceus* trees, the number of the GUs on the assessed axes ranged from 4 to 11 (average  $7.63 \pm 1.88$ ); the length of the GUs in this cohort ranged from 12.35 to 45 cm (average  $24.44 \pm 7.67$  cm); the diameter of the GUs ranged from 0.71 to 2.39 cm (average  $1.25 \pm 0.41$  cm) and the number of phytomers counted per GU ranged from 9 to 29 (average  $17.28 \pm 3.89$ ). In old trees of *P. erinaceus*, the number of the GUs present on the observed axis varied from 5 to 14 (average  $9.22 \pm 2.32$ ); the length of the GUs varied from

10.05 to 36.83 cm (average  $22.91 \pm 7.49$  cm); the diameter of the GUs varied from 0.6 to 2.27 cm (average  $1.09 \pm 0.42$  cm); the number of phytomers carried by the GUs of this cohort varied from 12 to 31.75 (average  $20.26 \pm 6.09$ ).

#### Influence of habitats on growth unit morphology

Variance analysis of morphological parameters evaluated according to habitat showed that the morphology of the growth units of axes in full sun and shade was statistically identical in *K. senegalensis* ( $P > 0.05$ ) while only the number of growth units in the different axes differed ( $P < 0.05$ ). The number of growth units was higher in axes growing in the shade than in full sun (table III). In *P. erinaceus*, the number of growth units per axis and the number of phytomers per growth unit differed from one environment to another ( $P < 0.05$ ) and were higher in the shade (table III) whereas the length and diameter of the growth unit remained statistically unchanged whatever the environment considered ( $P > 0.05$ ).

#### Influence of location on growth unit morphology

Comparison of the morphological dimensions of the growth units according to the vegetation and climatic gradient revealed highly significant differences ( $P < 0.05$ ) between locations for each of the morphological parameters assessed, regardless of the species (table IV). The variation in these parameters neither increased nor decreased along the bioclimatic gradient and did not follow the order of the locations along the south-north gradient (table IV).

#### Influence of the tree development stage on the growth unit morphology of the individuals

Analysis of variance showed that in *K. senegalensis*, the length of the growth unit and the number of phytomers per growth unit differed according to the development stage ( $P < 0.05$ ), while the number of growth units per axis and the mean diameter of the growth unit remained the same ( $P > 0.05$ ). Indeed, the growth unit was longer in young individuals and shorter in adult and old individuals and the number of phytomers per growth unit increased from the youngest to the oldest individuals (table V). In *P. erinaceus*, most of the parameters evaluated did not vary from one development stage to another ( $P > 0.05$ ), except the number of phytomers per growth unit, which increased from the youngest to the oldest individuals ( $P < 0.05$ ).

**Table V.**  
 Variation in morphological parameters of the growth unit according to the age category of the individuals (size).

Species	Age category	Axis-GU-n°	GU-length (cm)	GU-diam (cm)	GU-phyto-n°
<i>Khaya senegalensis</i>	Old-tree	8.25 ± 0.33a	18.02 ± 1.09b	1.37 ± 0.05a	19.77 ± 0.82a
	Min-Max	5-12	6.2-38.85	0.74-2.04	13-33
	Adult-tree	8.25 ± 0.43a	17.38 ± 1.42b	1.33 ± 0.08a	17.75 ± 1.01ab
	Min-Max	5-14	5.15-31.77	0.74-1.93	10.5-29.5
	Young-tree	7.95 ± 0.41a	23.45 ± 2.28a	1.34 ± 0.06a	16.31 ± 0.64b
	Min-Max	2-21	5.8-67.8	0.41-3.81	7-38
	<b>Pr &gt; F</b>	<b>0.8700</b>	<b>0.0213</b>	<b>0.9463</b>	<b>0.0103</b>
<i>Pterocarpus erinaceus</i>	Old-tree	9.22 ± 0.54a	22.9 ± 1.76a	1.09 ± 0.09a	20.26 ± 1.43a
	Min-Max	5-14	10.05-36.83	0.6-2.27	12-31.75
	Adult-tree	7.63 ± 0.34a	24.44 ± 1.4a	1.25 ± 0.07a	17.28 ± 0.71b
	Min-Max	4-11	12.35-45	0.71-2.39	9-29
	Young-tree	7.94 ± 0.47a	21.66 ± 1.06a	1.16 ± 0.12a	14.99 ± 0.62c
	Min-Max	2-19	6.55-62.4	0.32-10.51	4.5-28.75
	<b>Pr &gt; F</b>	<b>0.3324</b>	<b>0.3520</b>	<b>0.8528</b>	<b>0.0007</b>

Values with the same letters are not statistically different at the 5% threshold (SNK). Axis-GU-n° = number of growth units per axis measured; GU-length = mean length of growth units in centimeters; GU-diam = mean diameter of growth units in centimeters; GU-phyto-n° = mean number of phytomers per growth unit; Min = minimum and Max = maximum.

### Influence of the season on growth unit morphology

In *K. senegalensis*, comparison of the morphological dimensions of the growth units according to the season revealed a significant difference between the rainy (optimal) and dry (constraining) seasons both in the length of the growth units and in the number of phytomers per growth unit ( $P < 0.05$ ). The average diameter of the growth unit remained the same from one season to another ( $P > 0.05$ ), whereas the growth units were longer and the number of phytomers per growth unit higher in the rainy season (table VI). In *P. erinaceus*, analysis of variance (table VI) revealed no significant difference between the rainy and dry seasons in all the morphological parameters assessed along the axes ( $P > 0.05$ ).

### Variation in growth unit morphology between target species

Table VII shows there was no significant difference between the two species in any of the morphological dimensions we measured ( $P > 0.05$ ). All the morphological parameters of the axis-bearing growth units in *K. senegalensis* and *P. erinaceus* were almost identical ( $P > 0.05$ ).

Figures 4 and 5 shows an average distribution pattern of the number of phytomer per growth unit and of the growth stops or limits (GS) of the growth unit along an axis in the two species studied. The growth stop zones are generally marked by small leaves or leaf scales or by successive very short internodes often identical in length.

## Discussion

The forms of plant growth have been the subject of many studies, but are still poorly defined and continually questioned because of the inconsistency and heterogeneity of the different methods used to analyze them. The sustainable management of plant genetic resources must take into account all possible aspects of methodological approaches including architectural concepts (retrospective analysis) and the phenological cycle of trees. This study dealt with the effect of different factors, i.e. the type of light type (full sunlight and

**Table VI.**  
 Comparison of morphological parameters of the growth units according to the season.

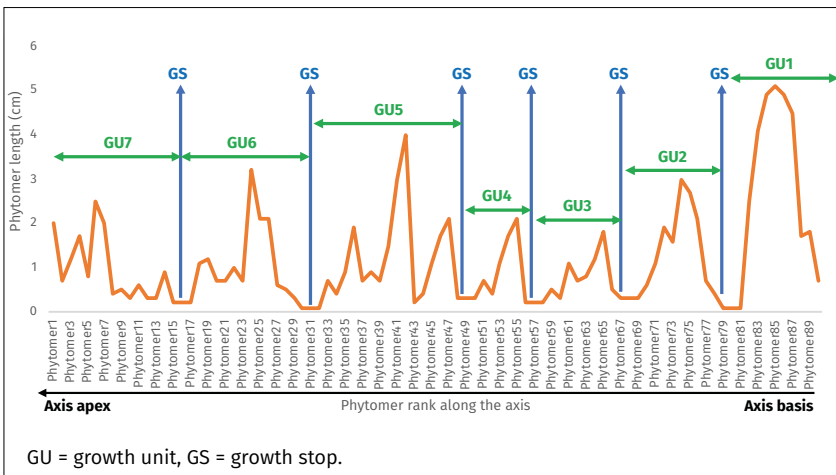
Species	Season	Axis-GU-n°	GU-length (cm)	GU-diam (cm)	GU-phyto-n°
<i>Khaya senegalensis</i>	Dry season	7.73 ± 0.34a	18.12 ± 2.78b	1.34 ± 0.07a	16.36 ± 0.83b
	Min-Max	5-17	5.15-67.8	0.7-3.81	7-38
	Rainy season	8.4 ± 0.41a	24.46 ± 0.76a	1.34 ± 0.05a	18.34 ± 0.47a
	Min-Max	2-21	9.97-46.07	0.4-2.88	8.25-26.75
	<b>Pr &gt; F</b>	<b>0.2227</b>	<b>0.0028</b>	<b>0.8883</b>	<b>0.0388</b>
<i>Pterocarpus erinaceus</i>	Dry- season	8.06 ± 0.5a	22.43 ± 0.87a	1.05 ± 0.15a	15.78 ± 0.68a
	Min-Max	3-19	6.55-44.40	0.32-2.53	4.5-31.5
	Rainy- season	8.08 ± 0.41a	22.47 ± 1.32a	1.29 ± 0.05a	16.64 ± 0.72a
	Min-Max	2-21	9.53-62.4	0.41-3.11	5.5-31.75
	<b>Pr &gt; F</b>	<b>0.9617</b>	<b>0.9772</b>	<b>0.1525</b>	<b>0.3843</b>

Values with the same letters are not statistically different at the 5% threshold (SNK). Axis-GU-n° = number of growth units per axis measured; GU-length = mean length of growth units in centimeters; GU-diam = mean diameter of growth units in centimeters; GU-phyto-n° = mean number of phytomers per growth unit; Min = minimum and Max = maximum.

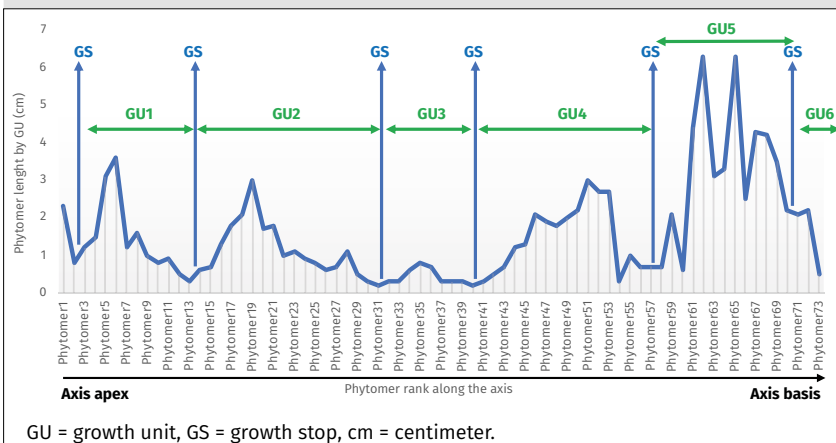
**Table VII.**  
Comparison of growth unit morphology between target species.

Species	Axis-GU-n°	GU-length (cm)	GU-diam (cm)	GU-phyto-n°
<i>Khaya senegalensis</i>	8.06 ± 0.27a	21.265 ± 1.47a	1.35 ± 0.04a	17.35 ± 0.48a
Min-Max	2-21	5.15-67.8	0.4-3.81	7-38
<i>Pterocarpus erinaceus</i>	8.04 ± 0.32a	22.45 ± 0.79a	1.1 ± 0.08a	16.22 ± 0.49a
Min-Max	2-19	6.55-62.4	0.32-3.11	4.5-31.75
<b>Pr &gt; F</b>	<b>0.9587</b>	<b>0.9997</b>	<b>0.0595</b>	<b>0.1009</b>

Values with the same letters are not statistically different at the 5% threshold (SNK). Axis-GU-n° = number of growth units per axis measured; GU-length = mean length of growth units in centimeters; GU-diam = mean diameter of growth units in centimeters; GU-phyto-n° = mean number of phytomers per growth unit; Min = minimum and Max = maximum.



**Figure 4.**  
Variation in the size and number of phytomers per growth unit along the axes observed in *Khaya senegalensis*.



**Figure 5.**  
Variation in the size and number of phytomers per unit of growth along a *Pterocarpus erinaceus* axis.

shade) in different locations along a gradient of climate; the age of individuals; and the seasonality (rainy vs dry season) on the growth unit morphology of the different types of axes in *K. senegalensis* and *P. erinaceus* in Côte d'Ivoire.

### Morphology of growth units

Our results showed that whatever the species, growth stops are represented by very short successive internodes. The same observations have been made in many species in Europe and Latin America (Barthélémy and Caraglio, 2007), notably in Beech (*Fagus sylvatica* L.) (Nicolini, 2000), in Jacquot wood (*Laetia procera*) and Angelica (*Dicorynia guianensis*) (Heuret *et al.*, 2003), in Walnut (*Juglans regia* L.) (Sabatier *et al.*, 1998), in *Cedrus atlantica* (Sabatier and Barthélémy, 1999), in *Fagus sylvatica* (Nicolini and Caraglio, 1994), in *Parkia velutina* (Nicolini *et al.*, 2012). The shape of the growth units depends on the optimal growth conditions of the species driven by the functioning of the terminal meristems. If the growth conditions are limiting (lack of water, crowded environment, etc.), the growth units will be lean (short with a small diameter and many very short internodes per growth unit), in contrast to those in a favourable environment (long growth units, large diameter and a small number of very long internodes per growth unit). The morphology of the growth units is thus an indicator of environmental conditions.

### Influence of habitats

Specifically, the number of growth units per axis and the number of phytomers per growth unit were high, and growth unit were shorter in the shade (individuals growing in undergrowth) than in individuals growing in full sun in both species. This means that the shady environment (undergrowth) is less favourable for the optimal development of the species. Indeed, when conditions are optimal, shoot development is harmonious, and continuous, with fewer large organs. Full sunlight favours the optimal development of the individuals and should be preferred for planting establishment. The crown diameter of the individuals developing in open environments in both species was wider and well-rounded with large oblique branches made up of leaves at the end and openings in the crown allowing sunlight to pass through. On the other hand, the trees developing in shady environments or in undergrowth had tapering, tufty crowns and vertical branches reaching for the light of the canopy. These results have also been reported in sev-

eral studies (Nicolini and Caraglio, 1994; Tousignant and Delorme, 2006; Abidi, 2012; Calonnec, 2013). The individuals developed a large number of growth stops and phytomers per growth unit. These observations show that it is difficult to develop in undergrowth. Moreover, in these conditions the individuals are subject to possible attacks by various insect species. The more repetitive the stoppages along the axis, the less likely the plant to survive. In these cases, individuals struggle to develop and produce reliable reproductive entities. On the other hand, when there are few growth stops along an axis, this indicates harmonious development and successful growth. For this reason, the undergrowth habitat cannot be recommended for optimising the success of cultivation with these species.

The analyses of variance used show that, overall, the environment (full sun and undergrowth) in which the trees of both species grow does not seem to affect all the morphological parameters assessed ( $P > 0.05$ ). Only the number of growth units per axis was significantly influenced by the habitat in the two species ( $P < 0.05$ ). As well as the number of phytomers per growth unit in *P. erinaceus* ( $P < 0.05$ ). Normally, the type of light would be expected to have a significant effect on the morphology of the growth units. This is certainly due to the fact that the light available in the undergrowth was favourable and tolerable for the development of the species' shoots, and could also be due to the genetic programme of architectural development that was properly expressed by each species. According to Hallé and Keller (2019), architecture is the expression of the genetic programme of plant growth and development visible to the naked eye.

#### **Influence of location**

Analysis of the variance of the morphological parameters evaluated as a function of the location along a south-north vegetation and climate gradient revealed that location had a significant influence on the morphology of the growth units of the two-target species ( $P < 0.05$ ). In fact, even if the locations surveyed were chosen along a decreasing gradient of vegetation density, each location has its own characteristics (climate, soil type, rainfall, relative humidity, etc.) that distinguishes it from the others. In addition, in the current context of climate change, the climatic and micro-climatic parameters are very unstable, uncontrolled and show high daily variations. Sabatier (1999), Lauri *et al.* (2010) and Calonnec (2013) showed that the depth and fertility of the soil, the environment and the age of the individuals can influence the architectural development of a species. Maranz and Wiesman (2003), and Soloviev *et al.* (2004) also reported that climate or an ecological gradient had an effect on plant morphology. Similarly, Salazar and Quesada (1987) then Assogbadjo *et al.* (2006) reported that the origin of differences in tree morphology lies in factors such as soil type and the genetic characteristics of the sampled individuals.

In *K. senegalensis*, the lengths and diameters of the growth units were maximum in Bouaké. The environment in Bouaké could thus favour shoot development and improve the success of a forest management programme targeting

this species. In *P. erinaceus*, large shoot sizes were obtained in Toumodi and Bouaké (i.e. in centre of the country), where locations are favourable for the successful establishment of *P. erinaceus* plantings.

#### **Influence of the age of the individuals sampled (size of the individuals)**

Our study showed that the majority of morphological dimensions differed in young, adult and old individuals of *K. senegalensis* ( $P < 0.05$ ). Indeed, the plant function capacities (strength, adaptation and photosynthesis) for the establishment of organs differed depending on the age of the individual, and this also influenced the dimensions of the plant organs, whereas in the species *P. erinaceus*, only the number of phytomers per growth unit was influenced by the age of the individual ( $P < 0.05$ ). Growth of *P. erinaceus* was very slow compared to that of *K. senegalensis*; in the former, the shoots of the crowns are synchronous and take time to develop whatever the growth stage. This gives the impression that the shoots of young and old individual have the same morphology. However, the difference in the number of phytomers per growth unit in each age category showed that adult and old individuals were better developed than younger ones. Indeed, even though some studies have shown that the age of individuals influences tree morphology (Sabatier, 1999; Assogbadjo *et al.*, 2006; Lauri *et al.*, 2010); it should be noted that the crown setting of trees and the organogenesis of macro-anatomical markers of a species is intrinsic to the genome of a plant (Hallé and Keller, 2019). Whatever the age of the plant, the expression or architectural development of a species may be plastic, but remains the same. In some cases, architecture can be influenced by environmental conditions, but this influence remains limited because, regardless of age, the majority of species follow their architectural programme and return to their original architectural development sequence.

In *K. senegalensis*, the growth units were longer in small (young) individuals with fewer internodes per growth unit, meaning that individuals develop most when young. Young individuals (cuttings) would be ideal for the selection of suitable genotypes for a natural or artificial forest regeneration programme based on this species, unlike *P. erinaceus*, in which selection could be conducted at all levels or in all age categories. In fact, the development of shoots of *P. erinaceus* is identical from one age to another, except for the number of phytomers per growth unit, which increases from the youngest to the oldest.

#### **Influence of the season**

In *K. senegalensis*, the season influenced the morphological development of the growth units, whereas the season had no influence in *P. erinaceus*. In *K. senegalensis*, in the rainy season, the length and number of phytomers per growth unit were greater than in the dry season. This is very logical since water is essential for plant growth and development. Water guarantees the physiological development and harmonious functioning (metabolism, photosynthesis,

organogenesis, etc.) of all living beings, especially plants, while water stress slows down all physiological activity up to withering.

The rainy season is thus the most favourable period to establish agroforestry and reforestation programmes based on these species and to increase their survival rate after transplanting in Côte d'Ivoire.

### Comparison of target species according to growth unit morphology

Our observations showed that *K. senegalensis* and *P. erinaceus* have practically identical growth unit morphologies. Even if the two species belong to different families (*K. senegalensis* to Meliaceae and *P. erinaceus* to Fabaceae), their architecture could be almost the same (Hallé and Keller, 2019), which we intend to verify in a future study (architectural development of the two-target species). In their study, Hallé and Keller (2019) indicated that most species in the Meliaceae family follow Werner Rauh's model of architectural development, as confirmed by our field observations in *K. senegalensis*. The same authors also showed that the majority but not all species belonging to three legume sub-families (Fabaceae, Caesalpiniaceae and Mimosaceae), particularly Fabaceae, follow Wilhelm Troll's model. However, we believe that *P. erinaceus* architectural model is more similar to the model of Paul Champagnat, as the species is a reiterated complex of unbranched axes and discrete branching with short branches. The axes are vertical at their base while their distal end represents a curve with a large radius, brought back to the horizontal or collapsed due to the gravity and flexibility of the wood. The leaves are spirally arranged while inflorescences can be either lateral or terminal like in *Parkia biglobosa*. This hypothesis will be tested in further studies.

## Conclusions

This study allowed us to observe and identify a number of factors that influence the morphology of crown growth units in *Pterocarpus erinaceus* Poir. and *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. which are necessary for their sustainable management. Our results show that growth unit morphology is an indicator of the best environmental or climate conditions for growth. Different light conditions (full sunlight or shade) did not significantly alter the morphology of the growth units in either species, but full sunlight enabled good general development of the growth units, showing that full sunlight is favourable for plot establishment. The size of the growth units varied significantly from one location to another due to different environmental characteristics (microclimate, soil type, rainfall, etc.); the shoots were well developed in the southern part of the climate gradient selected for this study (central part of Côte d'Ivoire: Toumodi and Bouaké). This zone is more favourable for these two species and should be chosen over other possible zones for a reforestation program. The age of the individuals was seen to influence the number of phytomeres per growth unit. Young individuals (cuttings) are ideal for the selection

of adapted and resilient genotypes due to the ability of their shoots to regenerate rapidly under optimal conditions (immediate synchronization). The size of the *K. senegalensis* growth units increased significantly in the rainy season. In contrast, the season had no significant effect on the size of the growth units in *P. erinaceus*. The growth units of *K. senegalensis* had almost the same dimensions as those of *P. erinaceus*, the two species may thus have identical architectural characteristics. This hypothesis will be tested in a comparative architectural study, as such information is important to complete the data required for the establishment of forest plantings under ongoing climate change. Our results contribute to understanding the functioning of the crown and the adaptation of the two species to global climate change and could guide the choice of environments and seasons for the implementation of reforestation or agroforestry programs based on these two species.

### Acknowledgements

The authors are grateful to the *Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement* (CIRAD) for providing the technical equipment required to conduct the study.

### Funding

This study was financed by the Ministry of Higher Education and Scientific Research of Côte d'Ivoire, the French Development Agency and IRD (*Institut de Recherche pour le Développement*) in the framework of PRESeD-CI 2 (Renewed Partnership for Research for Development in Côte d'Ivoire) and C2D (Debt Reduction Contract) of the AMRUGE-CI project (Support for the Modernization and Reform of Universities and *Grandes Écoles* of Côte d'Ivoire).

### Data availability

The datasets generated during and/or analyzed in the current study are available on: Adji, Beda Innocent, 2022, "Growth unit morphology and biomass in *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. (Meliaceae), *Pterocarpus erinaceus* Poir. (Fabaceae) and *Parkia biglobosa* (Fabaceae) according to habitat and climate in Côte d'Ivoire", <https://doi.org/10.7910/DVN/I37ABC>, Harvard Dataverse, V1.

## References

- Abidi F., 2012. Effets de la qualité de la lumière sur l'élaboration de l'architecture du rosier buisson. Thèse de doctorat, Université de Tunis El Manar, Tunisie, 277 p. <https://theses.hal.science/tel-00871779>
- Adji B. I., Akaffou S. D., Kouassi K. H., Houphouet Y. P., Duminiel J., Sabatier S., 2020. Influence of different environments on germination parameters and seedling morphology in *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss (Meliaceae). *American Journal of Plant Sciences*, 11: 1579-1600. <https://doi.org/10.4236/ajps.2020.1110114>

- Adji B. I., Akaffou S. D., Kouassi K. H., Houphouet Y. P., Duminil J., Sabatier S., 2021a. The Effect of four abiotic factors on macro-anatomical markers development in *Parkia biglobosa*, Jack, R. Br., 1830 (Fabaceae) crown. American Journal of Plant Sciences, 12: 645-661. <https://doi.org/10.4236/ajps.2021.124044>
- Adji B. I., Akaffou S. D., Kouassi K. H., Houphouet Y. P., Duminil J., Sabatier S., 2021b. Bioclimate influence on seed germination and seedling morphology parameters in *Pterocarpus erinaceus* Poir., 1804 (Fabaceae). International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology, 6 (3): 2456-1878. <https://dx.doi.org/10.22161/ijeab.63.1>
- Adji B. I., Akaffou S. D., Kouassi K. H., Houphouet Y. P., Dereffye P., Duminil J., Jaeger M., Sabatier S., 2021c. Allometric models for non-destructive estimation of dry biomass and leaf area in *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss., 1830 (Meliaceae), *Pterocarpus erinaceus* Poir., 1804 (Fabaceae) and *Parkia biglobosa* (Jacq.) R. Br., 1830 (Fabaceae). Trees, 35 (6): 1905-1920. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02159-y>
- Akaffou S. D., Kouamé K. A., Gore B. B. N., Abessika Y. G., Kouassi K. H., Hamon P., et al., 2019. Effect of the seeds provenance and treatment on the germination rate and plants growth of four forest trees species of Côte d'Ivoire. Journal of Forestry Research, 73: 87-90. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01064-y>
- Ake-Assi L., 1999. Effets de l'exploitation forestière sur la conservation de la diversité biologique en Afrique de l'Ouest : le cas de la Côte d'Ivoire. In : Ouédraogo A. S., Boffa J.-M. (éds). Vers une approche régionale des ressources génétiques en Afrique sub-saharienne. Actes du premier atelier régional de formation sur la conservation et l'utilisation durable des ressources génétiques forestières en Afrique de l'Ouest, Afrique Centrale et Madagascar. Mars 1998. Ouagadougou, Burkina Faso, CNSF/IPGRI, 101-106.
- Assogbadjo A. E., Kynd T., Sinsin B., Gheysen G., Van Damme P., 2006. Patterns of genetic and morphometric diversity in Baobab (*Adansonia digitata* L.) populations across different climatic zones of Benin (West Africa). Annals of Botany, 97: 819-830. <https://doi.org/10.1093/aob/mcl043>
- Barthélémy D., Caraglio Y., 2007. Plant architecture: a dynamic, multilevel and comprehensive approach to plant form, structure and ontogeny. Annals of Botany, 99: 375-407. <https://doi.org/10.1093/aob/mcl260>
- Calonnec A., 2013. Façonner l'architecture végétale pour contrôler les maladies des plantes. BIOFUTUR, 343 : 37-42.
- Chaubert-Pereira F., Caraglio Y., Lavergne C., Guédon Y., 2009. Identifying ontogenetic, environmental and individual components of forest tree growth. Annals of Botany, 104: 883-896. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01197503>
- CITES, 2016. Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction – Notification of the Parties N° 2016/008. CITES, UNEP, 1 p. <https://cites.org/sites/default/files/notif/F-Notif-2016-008.pdf>
- Dumenu W. K., 2019. Assessing the impact of felling/export ban and CITES designation on exploitation of African rosewood (*Pterocarpus erinaceus*). Biological Conservation, 236: 124-133. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.05.044>
- Goba A. E., Koffi G., Raoul S. S., Leonie C. K., Yeboa A. K., 2019. Structure démographique et régénération naturelle des peuplements naturels de *Pterocarpus erinaceus* Poir. (Fabaceae) des savanes de Côte d'Ivoire. Bois et Forêts des Tropiques, 341 (3) : 5-14. <https://doi.org/10.19182/bft2019.341.a31750>
- Godin C., Caraglio Y., 1998. A multiscale model of plant topological structures. Journal of Theoretical Biology, 191: 1-46. <https://doi.org/10.1006/jtbi.1997.0561>
- Hallé F., Keller R., 2019. Mais d'où viennent les plantes ? Arles, France, Actes Sud, 179 p.
- Hallé F., Oldeman R. A. A., Tomlinson P. B., 1978. Tropical trees and forests: an architectural analysis. Berlin, Germany, Springer-Verlag, 34 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-81190-6>
- Hallé F., Martin R., 1968. Étude de la croissance rythmique chez l'Hévéa (*Hevea brasiliensis* Mull. Arg.). Adansonia, Bulletin du Muséum national d'Histoire naturelle, Série 2, 8 (4) : 475-503.
- Heuret P., Nicolini E., Edelin C., Roggy J.-C., 2003. Approche architecturale pour l'étude des arbres de forêt tropicale humide guyanaise. Revue Forestière Française, 55 : 158-178. [http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/2042/5783/2/340\\_350.pdf.txt](http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/2042/5783/2/340_350.pdf.txt)
- Issa I., Wala K., Dourma M., Atakpama W., Kanda M., Akpagana K., 2017. Valeur ethno-botanique de l'espèce *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. (Meliaceae) auprès des populations riveraines de la chaîne de l'Atacora au Togo. Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires, 6 : 64-72.
- Kouassi K. C., Adji B. I., Traoré K., 2019. Floristic diversity of a Voluntary Natural Reserve (VNR) of Sucrivoire on the right bank of the Bandama river in Zuenoula, in the West Centre of Côte d'Ivoire. International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology, 4 (4): 909-918. <http://dx.doi.org/10.22161/ijeab.444>
- Kushwaha C. P., Tripathi S. K., Singh G. S., Singh K., 2010. Diversity of deciduousness and phenological traits of key Indian dry tropical forest trees. Annals of Forest Science, 67 (3): 310. <https://doi.org/10.1051/forest/2009116>
- Lauri P. E., Kelner J. J., Trottier J. C., Costes E., 2010. Insights into secondary growth in perennial plants: its unequal spatial and temporal dynamics in the apple (*Malus domestica*) is driven by architectural position and fruit load. Annals of Botany, 105: 607-616. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq006>
- Maranz S., Wiesman Z., 2003. Evidence for indigenous selection and distribution of the shea tree, *Vitellaria paradoxa*, and its potential significance to prevailing parkland savanna tree patterns in sub-Saharan Africa north of the equator. Journal of Global Biogeography, 30: 1505-1516. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2003.00892.x>
- Millan M., 2016. Analyse de la variabilité des traits architecturaux des formes de croissance dans les communautés végétales. Thèse de doctorat, botanique, Université de Montpellier, France, 178 p. <https://theses.hal.science/tel-02489116>
- Nicolini E., 2000. Nouvelles observations sur la morphologie des unités de croissance du hêtre (*Fagus sylvatica* L.). Symétrie des pousses, reflet de la vigueur des arbres. Canadian Journal of Botany, 78 : 77-87. <https://doi.org/10.1139/b99-162>
- Nicolini E., Caraglio Y., 1994. L'influence de divers caractères architecturaux sur l'apparition de la fourche chez le *Fagus sylvatica*, en fonction de l'absence ou de la présence d'un couvert. Canadian Journal of Botany, 72 : 1723-1734. <https://doi.org/10.1139/b94-213>

Nicolini E., Beauchêne J., Leudet., De la Vallée B., Ruelle J., Mangenet T., et al., 2012. Dating branch growth units in a tropical tree using morphological and anatomical markers: the case of *Parkia velutina* Benoist (Mimosoïdeae). *Annals of Forest Science*, 69: 543-555. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0172-1>

REDD+, 2017. Stratégie nationale REDD+, Côte d'Ivoire. 121 p. <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/lvc186335.pdf>

REDD+, 2020. Programme de réduction des émissions autour du Parc national de Taï. Secrétariat exécutif permanent REDD+ Côte d'Ivoire, 47 p.

Rutishauser E., Barthélémy D., Blanc L., Nicolini E., 2011. Crown fragmentation assessment in tropical trees: Method, insights and perspectives. *Forest Ecology and Management*, 261 (3): 400-407. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.10.025>

Sabatier S., Caraglio Y., Drénou C., 2014. L'architecture des arbres au service des forestiers. *Innovations Agronomiques*, 41 : 119-128. <https://www.researchgate.net/publication/303932946>

Sabatier S., 1999. Variabilité morphologique et architecturale de deux espèces de noyers : *Juglans regia* L., *Juglans nigra* L. et deux noyers hybrides interspécifiques. Thèse de doctorat, biologie végétale, Université de Montpellier II, France, 143 p. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00106305>

Sabatier S., Barthélémy D., 1999. Growth dynamics and morphology of annual shoots according to their architectural position in young *Cedrus atlantica* (Endl.) Manetti ex Carrière (Pinaceae). *Annals of Botany*, 84: 387-392. <https://doi.org/10.1006/anbo.1999.0939>

Sabatier S., Barthélémy D., Ducouso I., Germain E., 1998. Modalités d'allongement et morphologie des pousses annuelles chez le noyer commun, *Juglans regia* L. 'Lara' (Juglandaceae). *Canadian Journal of Botany*, 76 : 1253-1264. <https://doi.org/10.1139/b98-055>

Salazar R., Quesada M., 1987. Provenance variation in *Guzuma ulmifolia* L. in Costa Rica. *Commonwealth Forestry Review*, 66: 317-324.

Segla K. N., Adjonou K., Rabiou H., Bationo B. A., Mahamane A., Guibal D., et al., 2020. Relations between the ecological conditions and the properties of *Pterocarpus erinaceus* Poir. wood from the Guinean-Sudanian and Sahelian zones of West Africa. *Holzforchung*, 74 (11): 999-1009. <https://doi.org/10.1515/hf-2019-0250>

Soloviev P., Niang T. D., Gaye A., Totte A., 2004. Variabilité des caractères physicochimiques des fruits de trois espèces ligneuses de cueillette, récoltés au Sénégal, *Adansonia digitata*, *Balanites aegyptiaca* et *Tamarindus indica*. *Fruits*, 59 : 109-119. <https://doi.org/10.1051/fruits:2004011>

Taugourdeau O., Chaubert-Pereira F., Sabatier S., Guédon Y., 2011. Deciphering the developmental plasticity of walnut saplings in relation to climatic factors and light environment. *Journal of Experimental Botany*, 62 (15): 5283-5296. <https://doi.org/10.1093/jxb/err115>

Thiébaud B., 1982. Observations sur le développement de plantules de hêtre (*Fagus sylvatica*) cultivés en pépinières, orthotropie et plagiotropie. *Canadian Journal of Botany*, 60: 1292-1303. <https://doi.org/10.1139/b82-165>

Tousignant M.-E., Delorme M., 2006. Connaître le fonctionnement de la plante pour mieux gérer son environnement. Article paru dans Québec Vert (IQDHO). Adapté de : Understanding Plant Growth: A Review of the Basics, conférence

présentée lors de l'Ohio International Short Course 2005 par Paul A. Thomas et Bodie V. Pennisi, de l'Université de Georgie, et bonifié par l'équipe de l'IQDHO. Québec Vert, 3 p. [https://www.agrireseau.net/horticulture-serre/documents/07%20QVS%20fonctionnement%20\\_06\\_.pdf](https://www.agrireseau.net/horticulture-serre/documents/07%20QVS%20fonctionnement%20_06_.pdf)

#### Adji et al. – Author's contributions

Contributor role	Contributor names
Conceptualization	B. I. Adji
Data Management	B. I. Adji
Formal Analysis	B. I. Adji
Acquisition of funding	D. S. Akaffou, S. Sabatier
Survey and Investigation	B. I. Adji
Methodology	B. I. Adji
Project management	D. S. Akaffou, S. Sabatier
Resources	B. I. Adji, D. S. Akaffou, S. Sabatier
Software	B. I. Adji
Supervision	D. S. Akaffou, S. Sabatier
Validation	D. S. Akaffou, S. Sabatier
Visualization	D. S. Akaffou, S. Sabatier
Writing – Preparing the original draft	B. I. Adji
Writing – Reviewing and editing	B. I. Adji, D. S. Akaffou, S. Sabatier

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



# Real options analysis applied to investment projects in planted forests of *Pinus*

Danilo SIMÕES<sup>1</sup>  
Quinny SOARES ROCHA<sup>1</sup>  
Rafalele ALMEIDA MUNIS<sup>1</sup>  
Richardson BARBOSA GOMES DA SILVA<sup>1</sup>  
Giovani CAPRIOLI GARCIA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> São Paulo State University (UNESP)  
School of Agriculture, Department of  
Forestry, Soils, and Environment  
3780, Universitária Avenue  
Botucatu, 18610-034  
Brazil

**Auteur correspondant /  
Corresponding author:**

Danilo SIMÕES –  
[danilo.simoaes@unesp.br](mailto:danilo.simoaes@unesp.br)



**Photo 1.**  
Planted forests *Pinus* in Brazil.  
Photo D. Simões.

**Doi :** 10.19182/bft2022.354.a36895 – Droit d’auteur © 2022, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 21 décembre 2021 ;  
date d’acceptation : 18 août 2022 ; date de publication : 1<sup>er</sup> décembre 2022.



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

## Citer l’article / To cite the article

Simões D., Soares Rocha Q., Almeida Munis R., Barbosa Gomes da Silva R., Caprioli Garcia G., 2022. Analysis of real options applied to investment projects in planted forests of *Pinus*. Bois et Forêts des Tropiques, 354 : 55-64. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2022.354.a36895>

## RÉSUMÉ

### Analyse des options réelles appliquée aux projets d'investissement dans les forêts plantées à *Pinus*

Les forêts plantées sont des projets à long terme qui impliquent un apport monétaire important et qui nécessitent généralement l'intégration de flexibilités managériales. Comme la méthodologie traditionnelle d'évaluation économique ne permet pas l'intégration de ces flexibilités, notre étude visait à analyser la faisabilité économique des projets d'investissement dans les forêts plantées de *Pinus elliottii* Engelm., en appliquant une analyse des options réelles. Nous avons utilisé les données empiriques provenant d'un hectare de forêt plantée de *P. elliottii* avec un horizon de planification à 14 ans. Les flexibilités managériales ont été intégrées ensemble et séparément, en tant qu'options de report, d'extension ou d'abandon du projet d'investissement. À l'aide d'une simulation de Monte-Carlo, la valeur actuelle de 1,016 USD a été conditionnée aux valeurs de rendement anticipées de la deuxième à la quatorzième année, avec un rendement de volatilité de 14,5 %. Dans l'analyse des options réelles, la valeur des options combinées était de 29 USD, ce qui, en termes de valeur actuelle nette traditionnelle, a donné une valeur nette actualisée plus importante, de 468 USD. L'analyse des options réelles montre donc que les projets d'investissement dans les forêts plantées à *P. elliottii* sont économiquement faisables. Étant donné que l'analyse des options réelles est une méthodologie peu utilisée dans le secteur forestier pour l'analyse économique des projets d'investissement, cette étude peut être choisie pour aider les gestionnaires forestiers à analyser les risques et les décisions d'investissement, notamment ceux liés aux fluctuations du marché des forêts plantées de *Pinus* spp., dans l'hypothèse où les options réelles de report, d'expansion et d'abandon d'un projet d'investissement sont mises en œuvre.

**Mots-clés :** options combinées, valeur nette actualisée augmentée, économie forestière, flexibilité managériale, gestion des risques, sylviculture, Brésil.

## ABSTRACT

### Real options analysis applied to investment projects in planted forests of *Pinus*

Planted forests are long-term projects involving a large monetary contribution, and generally require the incorporation of managerial flexibility. As the traditional methodology for economic evaluation does not allow for the incorporation of these flexibilities, our study aimed to analyze whether investment projects in planted forests of *Pinus elliottii* Engelm. are economically feasible, by applying a real options analysis. We used empirical data from one hectare of a planted forest of *P. elliottii* with a 14-year planning horizon. Managerial flexibilities were incorporated in combinations and also separately, as options to defer, expand or abandon the investment project. Through Monte Carlo simulation, the present value of USD 1.016 was conditioned to anticipated return values from the second to the fourteenth year, with a volatility return of 14.5%. With real options analysis, the value of the combined options was USD 29, which, in terms of traditional net present value, showed an expanded net present value of USD 468. The real options analysis thus shows that investment projects in planted forests of *P. elliottii* are economically feasible. Given that real options analysis is a methodology not widely used in the forestry sector for economic analysis of investment projects, this study can be used to assist forest managers in analysing investment risks and decisions, specifically those related to market fluctuations of planted forests of *Pinus* spp., assuming that the real options of deferral, expansion and abandonment of an investment project are used.

**Keywords:** combined options, expanded net present value, forest economy, managerial flexibility, risk management, silviculture, Brazil.

## RESUMEN

### Análisis de opciones reales aplicadas a proyectos de inversión en plantaciones forestales de *Pinus*

Las plantaciones forestales son proyectos a largo plazo que implican una importante inversión económica y, por lo general, requieren flexibilidad en la gestión. Dado que la metodología tradicional de evaluación económica no permite incorporar esta flexibilidad, nuestro estudio pretendía analizar si los proyectos de inversión en plantaciones forestales de *Pinus elliottii* Engelm. son económicamente viables, aplicando un análisis de opciones reales. Utilizamos datos empíricos de una hectárea de un bosque plantado de *P. elliottii* con un horizonte de planificación de 14 años. La flexibilidad de gestión se incorporó en combinaciones y también por separado, como opciones para aplazar, ampliar o abandonar el proyecto de inversión. Mediante una simulación de Montecarlo, el valor actual de 1,016 USD se condicionó a los valores de rendimiento previstos del segundo al decimocuarto año, con una volatilidad de rendimiento del 14,5 %. Con el análisis de opciones reales, el valor de las opciones combinadas era de 29 USD, lo que, en términos de valor actual neto tradicional, representaba un valor actual neto ampliado de 468 USD. El análisis de opciones reales muestra, pues, que los proyectos de inversión en bosques plantados de *P. elliottii* son económicamente viables. Dado que el análisis de opciones reales es una metodología poco utilizada en el sector forestal para el análisis económico de los proyectos de inversión, este estudio puede servir de ayuda a los gestores forestales para analizar los riesgos y las decisiones de inversión, concretamente los relacionados con las fluctuaciones del mercado de las plantaciones forestales de *Pinus* spp., suponiendo que se utilicen las opciones reales de aplazamiento, ampliación y abandono de un proyecto de inversión.

**Palabras clave:** opciones combinadas, valor actual neto ampliado, economía forestal, flexibilidad de gestión, gestión de riesgos, silvicultura, Brasil.

## Introduction

The planted forests of *Pinus* spp. they are medium to long-term projects that require a significant monetary contribution and, in addition, are conditioned to the economic return only in the thinning year and at the end of the planning horizon. Allied to market fluctuations that influence the implementation and maintenance of these forests, it is necessary to consider the intrinsic uncertainties and incorporate managerial flexibilities for strategic decision-making.

The genus *Pinus* is widely used in pulp and paper, wood, and resin extraction industries. The costs of establishing forests represent the largest part of the investment until the cutting of the forest. Due to the financial support, investment analyzes are necessary that incorporate the uncertainties inherent in the plantations of *Pinus* spp., as for example, the value of inputs, revenues, wood price, and forest risks (Akita and Ohe, 2021; Soliño *et al.*, 2018).

By not considering these uncertainties, the traditional techniques of economic analysis of investment projects become inadequate. Given this, Lambrecht (2017) and Ragozzino *et al.* (2016) point out that real options analysis is presented as the most accurate approach, as it allows incorporating these uncertainties and managerial flexibilities that can limit exposure to risks inherent to the project, capture the real value of the project and provide greater security to forest managers.

Managerial flexibilities arise from the recognition that uncertainty significantly affects the expected performance of an investment project. Thus, real options analysis focuses on finding strategies that improve expected performance. With this analysis, the planning and execution of investment projects can be adapted to changing of conditions market in order to maintain or increase the profitability of the investment project (Cardin *et al.*, 2017; Kozlova, 2017).

Real options analysis is widely used in the economic analysis of investment projects (Gorupec *et al.*, 2022). In the forestry sector, it assists in the analysis of investment risk and in decision making. Despite the positive characteristics, studies involving analysis of real options in forestry investment projects are incipient, specifically those related to *Pinus* spp. (Tschulkow *et al.*, 2021; Sauter *et al.*, 2016).

A real option is a right, but not an obligation, to take future actions at opportune moments for the forest manager (Trigeorgis and Reuer, 2017; Black and Scholes, 1973). It captures the irreversibility of an investment project, which makes it possible to postpone and adapt decisions in a volatile economic scenario. Thus, the deferral option allows delaying the beginning or each stage of an investment project. By waiting for new information associated with the investment project or market environment, it is possible to add value by providing the right strategic path to investors (Ayodele and Olaleye, 2021).

The expansion option captures the possibility of building additional assets on top of the base asset. For-

est managers are motivated by the possibility of adding value to the project by investing capital. In favorable market times, the option to expand should be considered. This option can explore the ideal expansion strategy, considering the time and amount to be invested (Chen *et al.*, 2018; Vo and Le, 2017).

Exercised in situations where the expected present value of cash flows is unsatisfactory, the option to abandon equalizes or diminishes the shortfall in the value of the project. If it is exercised, the forest manager can receive all the money generated by the project's cash flows before the abandonment of the investment, or receive the residual value defined in the period of choice of option. This option offers the possibility of avoiding major losses in your planning (Deeney *et al.*, 2021; Adkins and Paxson, 2017).

Due to the uncertainties associated with investment projects, analyses that consider managerial flexibilities can show the real value of a biological asset. In this context, this study aimed to analyze whether investment projects in planted forests of *Pinus elliottii* Engelm. are economically viable through real options analysis.

## Materials and methods

### Data characterization

We carried out the study in one hectare of forest planted with *Pinus elliottii* Engelm., with a 14-year rotation and thinning at eight years, with an average annual increment of 28.6 m<sup>3</sup>/ha/year, in a 3 m x 2 m spacing (1,666 trees/ha), located in the State of Santa Catarina, Brazil. The soil was classified as dystrophic haplic Cambisol and the relief was flat, with a slope from 0.0% (flat) to smooth wavy (3.0% to 8.0%) according to dos Santos *et al.* (2018) and Speight and Landform (2009).

Considering the Köppen-Geiger classification, the region had a temperate oceanic climate – Cfb (always humid, with mild summers, dry winters, and occurrence of frosts). The average temperature in the region was 18.7 °C and average annual rainfall of 2,300 mm, with evenly distributed rainfall (Carvalho, 2018).

The silvicultural operations that took place in the year zero for the implantation of the planted forest consisted of the construction of firebreaks, topography services, mechanized application of herbicide, manual control of leaf-cutting ants with baits, soil preparation with a subsoiler coupled to the tractor, and planting pit. In planting and replanting, *Pinus elliottii* Engelm. seedlings produced in polyethylene tubes were used.

The other silvicultural operations, such as maintenance of firebreaks were carried out in year one, manual control of leaf-cutting ants with baits and mechanized application of post-emergence herbicide were carried out from year zero to year two and mechanized weed cutting was carried out from year zero to year three of the investment project in planted forests of *Pinus elliottii* Engelm.

Thinning was carried out in year eight and, according to the pre-harvest forest inventory, 496 trees were sampled with an average diameter at breast height of 17.0 cm and an average total height of 12.8 m, totaling 49.8 m<sup>3</sup> of wood. At the end of the 14-year cycle, 1,170 trees were sampled with an average diameter at breast height of 24.3 cm and an average total height of 45.7 m, totaling 350.7 m<sup>3</sup> of wood, estimated using the Schumacher and Hall linear equation. The wood production was divided into three assortments, the first for the manufacture of cellulose and the two other for the supply of raw material for sawmills.

### Economic analysis

#### Cash flow

The components of the project's cash flow were gross revenue, costs with forestry operations, overhead, lease of the land, forest exhaustion, and taxes in accordance with current legislation in the country. Further details regarding the components of costs, year of occurrence, and monetary values in our study are provided in the Supplementary Material. The input and output components of the investment project budget were sequenced and equated until year-14, the period of the planning horizon, due to the clear-cutting of the *Pinus elliottii* Engelm. planted forest. The cash flow can be characterized as unconventional since it has several outputs and only one input.

#### Project discount rate

In capturing the potential of the investment project, we chose to place it in the context of risk in the Brazilian wood and paper sector, in order to configure the appropriate reflexes of this investment alternative for forest managers. Thus, we apply the weighted average cost of capital methodology associated with the asset pricing model (Equation 1), as Franc-Dabrowska *et al.* (2021).

$$WACC = \left(\frac{E}{V}\right) K_E + \left(\frac{D}{V}\right) K_D(1 - t_c) + \left(\frac{P}{V}\right) K_P \quad (1)$$

where:  $E$  is the value of equity,  $D$  is the company's debt,  $P$  is the company's preferred stock,  $V$  is the total capital ( $E + D + P$ ),  $K_E$  is the cost of equity,  $K_D$  is the cost of debt,  $K_P$  is the cost of preferred stock, and  $t_c$  is corporate tax.

The creditor's capital estimate was calculated according to the spread of 2.6% for speculative credit countries in the Ba2 category, Brazil's current risk classification, according to Moody's (2021), added to the risk-free rate of return of 5.2%, obtained by the geometric average of the period between January 2, 1962 and January 25, 2021 of the US Treasury bond rate, called the 10-year rate on Treasury bonds, according to the United States Department of the Treasury (2021). According to Damodaran (2018), by preferring to consider long-term data, it is possible to reduce some type of unwanted trend to the data during the period considered.

The weighted average cost of capital (Equation 2) was applied to asset pricing (Cuervo *et al.*, 2021).

$$K_E = R_f + \beta_1 (R_m - R_f) + RP_{col} \quad (2)$$

where:  $R_f$  is the expected return on a risk-free asset;  $\beta_1$  is the

leveraged beta, which represents the risk associated with investment activity and the risk associated with financial leverage;  $(R_m - R_f)$  is the market premium over a well-diversified market index;  $RP_{col}$  is the country risk premium.

The estimate of the systematic risk coefficient was leveraged with the sensitivity of the asset's return. In contrast, what is predicted by the benchmark of publicly traded companies with shares traded on the Brazilian stock exchange B3 S.A. - Brasil, Bolsa, Balcão (2021) namely: Dexco S.A., Eucatex S.A. Indústria e Comércio, Klabin S.A. e Suzano S.A.

The market risk premium of -0.3 was obtained through the expected return on the forest market portfolio for a period of 10 years, resulting in an annualized return of 4.9%, based on the S&P Global Timber & Forestry Index (2021) with the rate of return on the risk-free asset.

The country risk premium of 3.9% was obtained through the geometric mean of the historical series of Brazil risk between April 29, 1994 and January 22, 2021, which represented the Emerging Markets Bond Index Plus, published by Morgan (2021). The rate that determined the cost of equity capital was 9.0%. Considering the proportion of third-party capital of 91.1%, calculated from the ratio between the assets and onerous liabilities of the company that owns the planted forest, and the proportion of equity of 8.9%, it was estimated 5.5% as the project discount rate.

#### Deterministic net present value

The deterministic net present value was used as an input to the dynamic model (Equation 3).

$$NPV = \sum \frac{R_j}{(1 + WACC)^j} - \sum \frac{C_j}{(1 + WACC)^j} \quad (3)$$

where:  $NPV$  is the deterministic net present value;  $R_j$  is the revenue at the end of year  $j$ ;  $C_j$  is the cost at the end of year  $j$ ;  $WACC$  is the project discount rate;  $j$  is the period of occurrence of the cost or revenue.

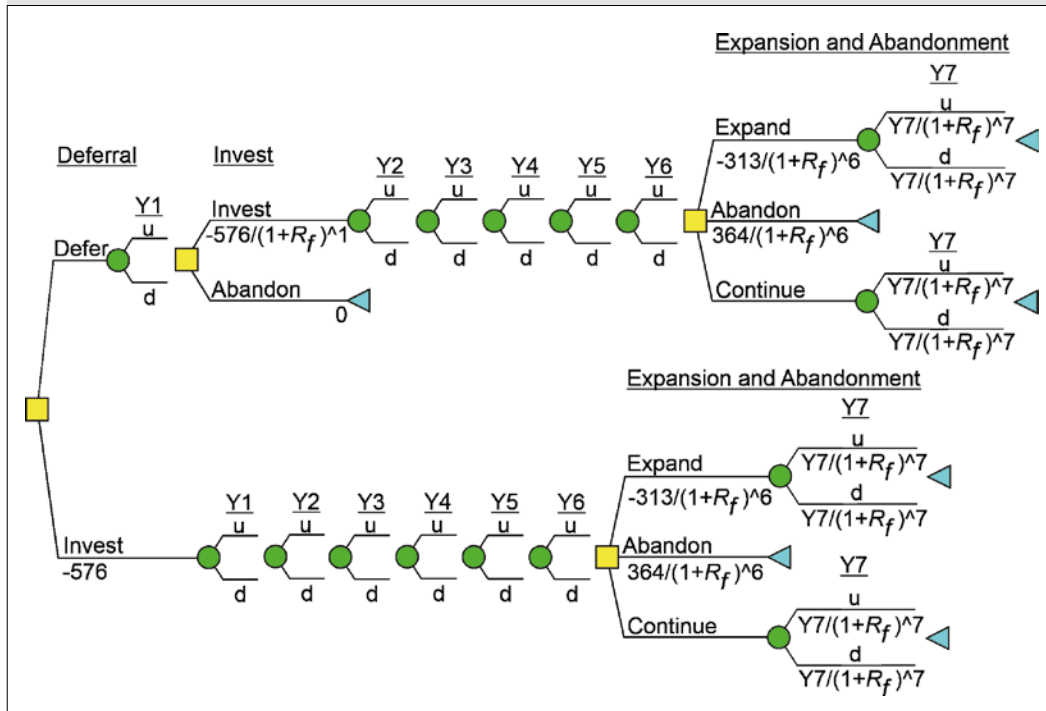
#### Investment project volatility and dynamic modeling

There are several sources of uncertainty in an investment project, mainly due to the dynamics of the financial market. We assume the price of wood (USD m<sup>-3</sup>) as a source of uncertainty, therefore, the volatility of the investment project in forests planted with *Pinus elliottii* Engelm. According to the uncertainty approach, developed by Copeland and Antikarov (2001), the volatility of the stochastic process of the fixed asset price follows a Geometric Brownian Motion (GBM) described in Equation 4:

$$P_t = P_{t-1} \cdot e^{(\alpha - \frac{\sigma^2}{2})\Delta t + \sigma \cdot \varepsilon \Delta t} \quad (4)$$

where:  $P_t$  is the price of the underlying asset at time  $t$ ;  $P_{t-1}$  is the price of the underlying asset at time  $t-1$ ;  $\alpha$  is the growth rate of  $P$  (drift);  $\sigma$  is the volatility;  $\varepsilon$  is the error with standard normal distribution;  $\Delta t$  is the increment of a Wiener process (increment of the random path of the selected variable, with normal distribution and definite time).

The source of uncertainty with the greatest influence on the present value of the considered project was the volatility ( $\sigma$ ) of the value of wood (USD m<sup>-3</sup>). Thus, according to Brandão *et al.* (2012), we estimated the project value at  $t = 1$



**Figure 1.** Binomial tree of underlying asset of *Pinus elliottii* Engelm. planted forest investment project with defer, expand, and abandon options combined. Where: Y is the year of the planning horizon; u is the increment level; d is the level of decrease;  $R_f$  is the risk-free rate..

and, in consonance with Marques *et al.* (2021), we adopted standard deviation of variable ( $\mathcal{E}$ ) as the volatility of stochastic project value (Equation 5).

$$\mathcal{E} = \ln \left( \frac{\sum_{t=1}^{t=n} \frac{F_t}{(1 + wacc)^{t-1}}}{V_0} \right) \quad (5)$$

where: ln is the Napierian logarithm;  $F_t$  is the cash flow structure of the project at time t;  $V_0$  is the present value of the project.

The simulation was implemented using the Monte Carlo method from 100,000 iterations, using the software @Risk Copyright© 2022 (Palisade Corporation, 2022). The parameters developed by Cox *et al.* (1979), derived from volatility ( $\sigma$ ) and the risk-free rate ( $R_f$ ), were used in the construction of a binomial mesh projected through GBM, which allowed modeling of the underlying asset (figure 1), that is, the project free of real options.

The binomial mesh allows two possibilities of movement, the increase movement (u) being described through Equation 6. The decreasing movement (d) was calculated according to Equation 7. We calculate the risk-neutral probability (p) with Equation 8 and its complementary (q) contemplated by Equation 9.

$$u = e^{\sigma\sqrt{\Delta t}} \quad (6)$$

$$d = \frac{1}{u} = e^{-\sigma\sqrt{\Delta t}} \quad (7)$$

$$p = \frac{e^{R_f\Delta t} - d}{u - d} \quad (8)$$

$$q = (1 - p) \quad (9)$$

where: e is the Napierian number;  $\sigma$  is the exponential of project volatility;  $\Delta t$  is the time variation, corresponding to the step size between the nodes of the binomial decision tree;  $R_f$  is the expected return on a risk-free asset.

Once the underlying asset has been modeled, we incorporate the real options of deferral, expansion, and abandonment into the investment project, assumed to be executables by managers, as applied by Munis *et al.* (2022). The inclusion of real options took place through the Decision Programming Language - DPL software (Syncopation Software, 2022).

The deferral option was the first to be included, making it possible to postpone the investment from the focal date to the end of year one at a cost of USD 576. Another managerial flexibility was to expand the project's capacity by 20.0% in the sixth year, at a cost of USD 313. In addition, in an economically divergent scenario, the possibility of abandoning the investment at the bonus of USD 364.

Furthermore, capturing the effect of options could be intensified by combining them. When considering the combined options, was considered the flexibility in the hierar-

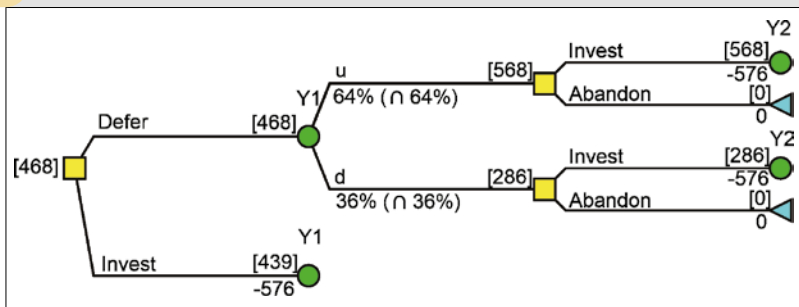


Figure 2.

Decision tree of the option to defer from year zero to year one of the investment project in planted forest of *Pinus elliottii* Engelm. Where: Y is the year of the planning horizon; u is the increment level; d is the level of decrease.

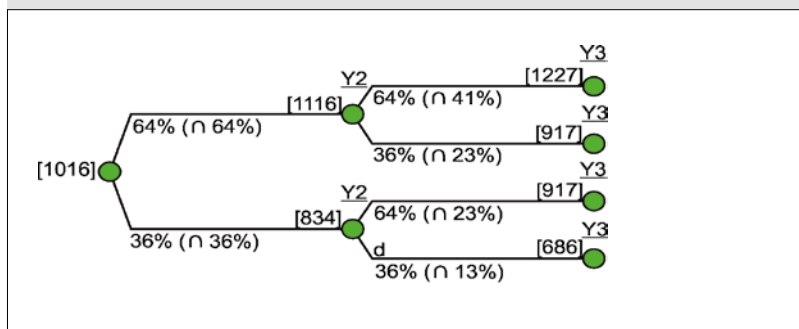


Figure 3.

Decision tree for the 20.0% expansion option in year six of the investment project in planted forest of *Pinus elliottii* Engelm. Where: Y is the year of the planning horizon; u is the increment level; d is the level of decrease.

Table I.

Input values of the decision tree binomial model of the investment project in planted forest of *Pinus elliottii* Engelm.

Parameters	Unit	Values
Average present value	USD	4,081
Standard deviation of present value	USD	±593
Random rate of return	-	1.3
Volatility	%	14.5
Increase movement	-	1.2
Decreasing movement	-	0.9
Risk-neutral probability	-	3.4
Complementary of risk neutral probability	-	-2.4

chy of relations. Thus, the deferral supported the exercise linked to the successive options of abandonment or expansion. The abandonment option was considered a pseudo-American option due to the configuration of the investment project for forest managers. From a pseudo-American option strategy, it was possible to incorporate greater flexibility to the abandonment option in two moments of the planned horizon. This American put option assumes exercise on the date that the highest value occurs.

## Results

The costs of silvicultural operations related to the implementation represented 60.5% of the total costs of the investment project in planted forests of *Pinus elliottii* Engelm. The present value and the deterministic NPV were USD 1,016 and USD 439, respectively. With the results of the Monte Carlo simulation and the parameters of the construction of the binomial tree (table I), it was possible to incorporate the options to defer, expand and abandon the underlying asset.

The value of the deferral option was USD 29, calculated from the difference between the expanded NPV (figure 2) and the deterministic NPV.

The value of the option to expand did not contribute to investment project returns when assuming the 20.0% expansion configuration in year six. Similarly, the value of the abandonment option was USD 0, as it was not an option to be exercised in the investment project in forests planted with *Pinus elliottii* Engelm (figure 3).

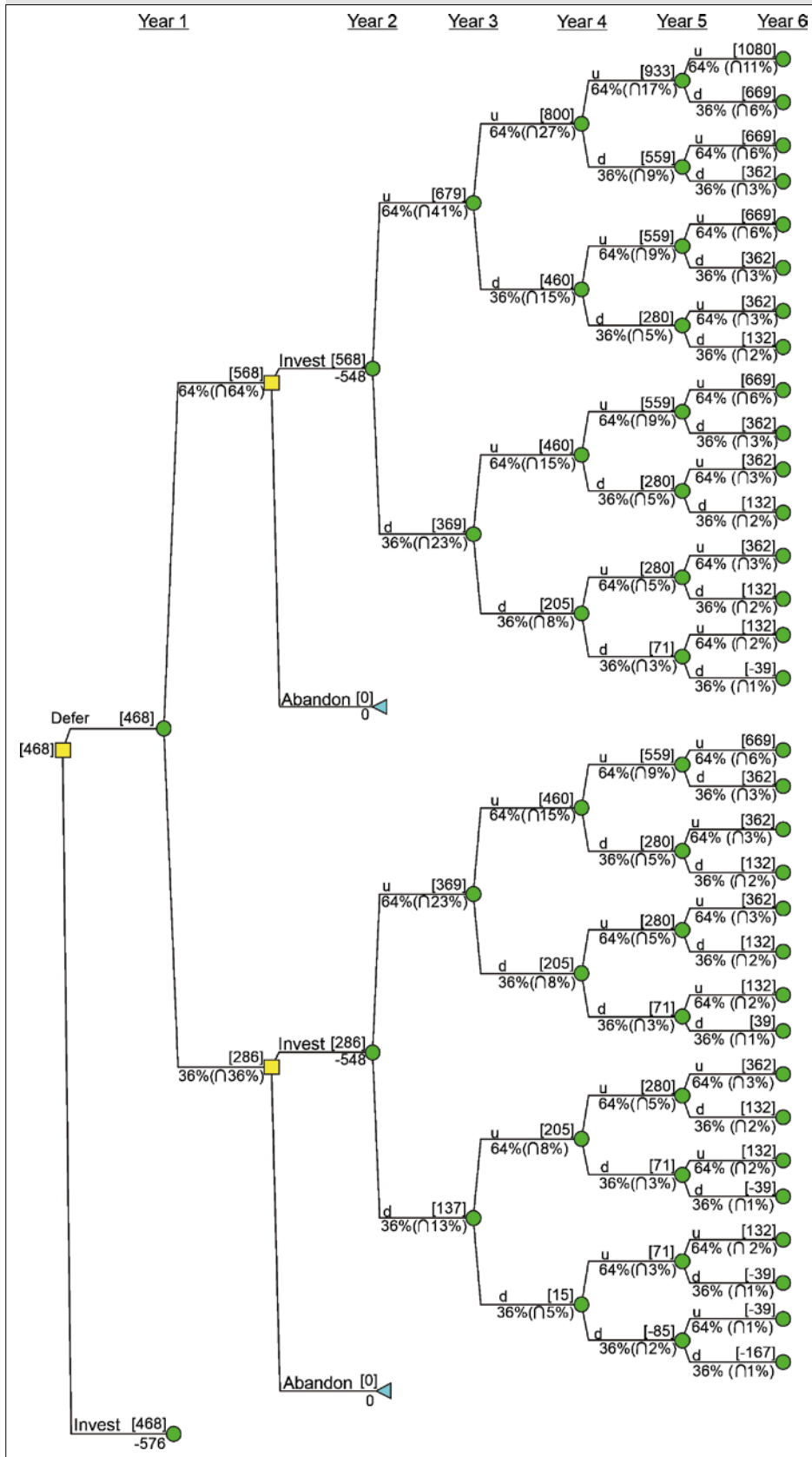
The value of the combined options was USD 29 (figure 4). The expanded NPV of USD 468 was 6.6% higher than the deterministic NPV of USD 439.

The probability of exercising the option to defer was 100.0% (figure 5), indicating the optimal option to delay the start of the investment project by one year. The expansion option was 0.0%, indicating that the best scenario was the permanence of the initial area of the project. The abandonment option resulted in 0.0%, demonstrating that proceeding with the project according to the initial planning was economically viable.

In investment projects in planted forests of *Pinus elliottii* Engelm. volatility represents the fluctuation in the price of wood. As it is directly related to the dispersion of the investment project's source of uncertainty, elevated volatility values impact higher returns (figure 6).

## Discussion

The costs of investment projects are decisive in the economic analysis, and consequently, in the feasibility of the investment project in forests planted with *Pinus elliottii* Engelm. When harvesting costs are not considered, as in commercial forestry plantations, the expenditures on forest implantation are the most expressive (Zastocki and



**Figure 4.** Decision tree of combined defer, expand, and abandon options of the *Pinus elliotii* Engelm. planted forest investment project. Where: *u* is the increment level; *d* is the level of decrease.

Kaliszewski, 2021). According to Diana *et al.* (2019), a positive NPV demonstrates that the investment project is economically viable. In this way, the investment project in forests planted with *Pinus elliotii* Engelm. can be considered economically viable, taking into account the positive NPV as a parameter in decision making.

Deferral provided forest managers with a less risk for waiting and obtaining more information before investing the capital (Nunes *et al.*, 2021). By presenting unconventional cash flow, investment projects of planted forests of *Pinus* spp., with revenue only in the year of thinning and clear cutting, the deferral promotes greater security in decision making for forest managers, when planning the optimal time to invest.

The deferral option must be evaluated as a call option. Thus, as the investment project does not pay dividends to its shareholders, the deferral option is always exercised. Investment never takes place before the maturity date when the underlying assets do not pay dividends.

The expansion option can be considered a complex call option (Berger *et al.*, 1996). As in the investment project of forests planted with *Pinus elliotii* Engelm options do not always add value to an investment project. Forest managers must be in synergy with the context in which they are inserted and, according to Bensoussan and Chevalier-Roignant (2019), find predictions about the optimal time for investment.

The abandon option helps forest managers investigate whether or not to abandon the investment under conditions of uncertainty (Liu *et al.*, 2019; Long *et al.*, 2020). The function of the abandonment option is not limited to monetary return, but evidence managers who

are aware of the risks and uncertainties to which they are exposed.

The combined options provide forest managers with the necessary support for more accurate strategic decisions, indicating the path to be followed along the planning horizon of the investment project of forests planted with *Pinus elliottii* Engelm. When the proposed options were exercised, the risk was reduced, and a greater return was obtained when compared to the traditional methodology.

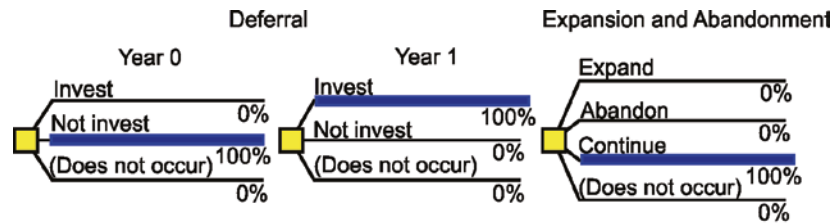
The oscillation in volatility exerts a direct influence on the value of the investment project. Miranda *et al.* (2017) and Foo *et al.* (2018) corroborate that volatility impacts expected yields according to uncertainties, and it is essential to consider it in the analysis of the economic viability of investment projects for forests planted with *Pinus elliottii* Engelm.

The costs of silvicultural operations, the medium to long-term planning horizon and the associated uncertainties and risks, undervalue investment projects for forests planted with *Pinus elliottii* Engelm. when analyzed using traditional techniques of economic analysis. With the analysis of real options, it was possible to incorporate uncertainties and managerial flexibilities, reducing investment risks, demonstrating the real value of the investment project.

## Conclusion

Investment projects in planted forests of *Pinus elliottii* Engelm. with assortments for pulp and sawmills are economically viable from the perspective of uncertainties and flexibilities attributed through real options analysis.

Deferring the initial investment in investment proj-



**Figure 5.**

Probability of execution of an optimal option considering the combined options of the *Pinus elliottii* Engelm. planted forest investment project.

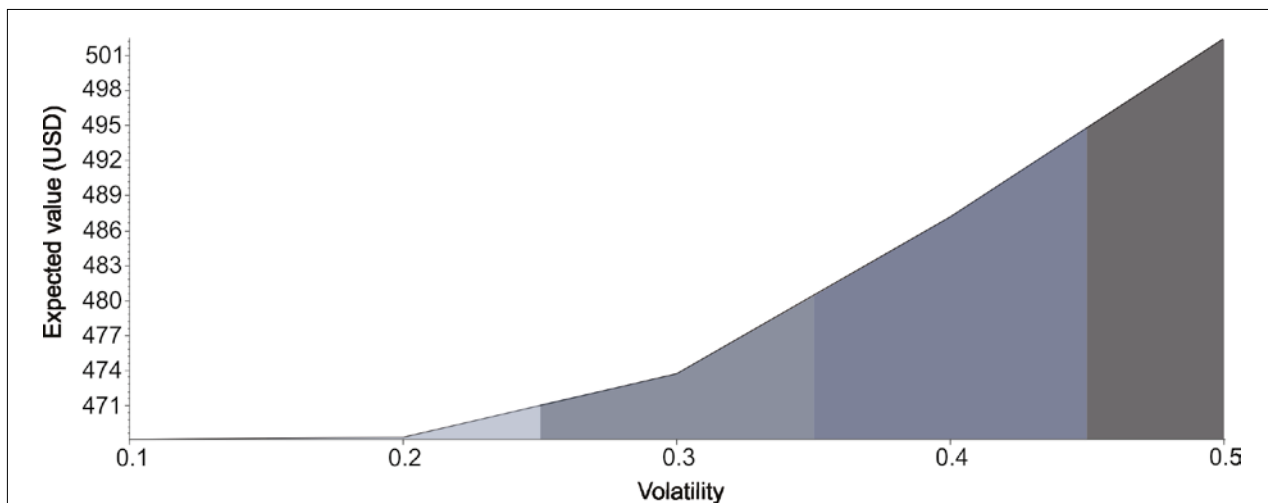
ects in planted forests of *Pinus elliottii* Engelm. minimizes the risks associated with the biological asset, granting the opportunity to gather more information before the application of capital.

The expansion option does not contribute to the economic returns from the investment project in planted forests of *Pinus elliottii* Engelm.

The abandonment option, although not exercised, can highlight the uncertainties that forest managers are exposed to.

The valuation of the biological asset occurs when the combined real options of the investment project in planted forests of *Pinus elliottii* Engelm. are incorporated, simulating the practice of forest management, when uncertainties affect the course of the investment.

Considering that in the forestry sector real options analysis is a methodology not widely used for economic analysis of investment projects, this work contributes to adding information to the literature in this field study. Furthermore, this work can be used to assist forest managers in the analysis of investment risk and in decision-making, specifically those related to market fluctuations of planted forests of *Pinus* spp., given that we use the real options of deferral, expansion, and abandonment of investment project. Thus, this study contributes to making the real options



**Figure 6.**

Expected value of the investment project in *Pinus elliottii* Engelm. planted forest as a function of volatility.



analysis more accessible and safer to forest managers, allowing it to increase its use in planted forest investment projects.

Based on the present findings, and on results in the literature, further research is recommended in order to test whether the real options analysis can identify the economic viability of forest investment projects with other species used in planted forests.

### Funding

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

### Data access

The data is available by using the following Internet link and citing the origin with the citation:

Simões D., Rocha Q. S., Almeida Munis R., Da Silva R. B. G., Garcia G. C., 2023. Supplementary Material (Cash flow components and discount rate). figshare. Dataset. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.21901611.v1>

## Références

Adkins R., Paxson D., 2017. The Effects of an Uncertain Abandonment Value on the Investment Decision. *European Journal of Finance*, 23 (12): 1083-1106. <https://doi.org/10.1080/1351847X.2015.1113195>

Akita N., Ohe Y., 2021. Sustainable Forest Management Evaluation Using Carbon Credits: From Production to Environmental Forests. *Forests*, 12 (8): 1-18. <https://doi.org/10.3390/f12081016>

Ayodele T. O., Olaleye A., 2021. Flexibility Decision Pathways in the Management of Uncertainty in Property Development: Experience from an Emerging Market. *Journal of Financial Management of Property and Construction*, 26 (3) 408-432. <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/JFMPC-05-2020-0037/full/html>

B3 S.A. - Brasil Bolsa Balcão, 2021. Séries Históricas. [http://www.b3.com.br/pt\\_br/market-data-e-indices/servicos-de-dados/market-data/historico/mercado-a-vista/series-historicas/](http://www.b3.com.br/pt_br/market-data-e-indices/servicos-de-dados/market-data/historico/mercado-a-vista/series-historicas/)

Bensoussan A., Chevalier-Roignant B., 2019. Sequential Capacity Expansion Options. *Operations Research*, 67 (1): 33-57. <https://doi.org/10.1287/opre.2018.1752>

Black F., Scholes M., 1973. The Pricing of Options and Corporate Liabilities. *Journal of Political Economy*, 81 (3): 637-654.

Brandão L. E. T., Dyer J. S., Hahn W. J., 2012. Volatility estimation for stochastic project value models. *European Journal of Operational Research*, 220: 642-648.

Cardin M. A., Zhang S., Nuttall W. J., 2017. Strategic Real Option and Flexibility Analysis for Nuclear Power Plants Considering Uncertainty in Electricity Demand and Public Acceptance. *Energy Economics*, 64: 226-237. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2017.03.023>

Carvalho P. E. R., 2018. Agência Embrapa de Informação

Tecnológica-Clima. [https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/especies\\_arboreas\\_brasileiras/arvore/CONT-000fumq9mmv02wyiv807nyi6s8sqe54x.html](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/especies_arboreas_brasileiras/arvore/CONT-000fumq9mmv02wyiv807nyi6s8sqe54x.html)

Chen S., Zhang Q., Wang G., Zhu L., Li Y., 2018. Investment Strategy for Underground Gas Storage Facilities Based on Real Option Model Considering Gas Market Reform in China. *Energy Economics*, 70: 132-142. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2017.12.034>

Cox J. C., Ross S. A., Rubinstein M., 1979. Option Pricing: A Simplified Approach. *Journal of Financial Economics*, 7 (3): 229-263.

Cuervo F. I., Arredondo-Orozco C. A., Marenco-Maldonado G. C., 2021. Photovoltaic Power Purchase Agreement Valuation under Real Options Approach. *Renewable Energy Focus*, 36: 96-107. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2020.12.006>

Damodaran A., 2018. *The Dark Side of Valuation*. 3rd ed. London, UK, Pearson. <https://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/pdfiles/country/darkside.pdf>

Deeney P., Cummins M., Heintz K., Pryce M. T., 2021. A Real Options Based Decision Support Tool for R&D Investment: Application to CO<sub>2</sub> Recycling Technology. *European Journal of Operational Research*, 289 (2): 696-711. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.07.015>

Diana S. R., Hidayat A., Rafikasari A., Ibrahim I. M., Farida F., 2019. Economic Assessment of Satellite Remote Sensing Data in Indonesia: A Net Present Value Approach. *International Journal of Economics and Financial Issues*, 9 (1): 140-146. <http://www.econjournals.com>

Foo N., Bloch H., Salim R., 2018. The Optimisation Rule for Investment in Mining Projects. *Resources Policy*, 55: 123-132. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.11.005>

Franc-Dabrowska J., Madra-Sawicka M., Milewska A., 2021. Energy Sector Risk and Cost of Capital Assessment-Companies and Investors Perspective. *Energies*, 14 (6): 1-20. <https://doi.org/10.3390/en14061613>

Gorupec N., Brehmer N., Tiberius V., Kraus S., 2022. Tackling Uncertain Future Scenarios with Real Options: A Review and Research Framework. *The Irish Journal of Management*, 41 (1): 69-88. <http://dx.doi.org/10.2478/ijm-2022-0003>

Kozlova M., 2017. Real Option Valuation in Renewable Energy Literature: Research Focus, Trends and Design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80: 180-196. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.166>

Lambrecht B. M., 2017. Real Options in Finance. *Journal of Banking and Finance*, 81: 166-171. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jbankfin.2017.03.006>

Liu Y., Jiang I. M., Tsai M. I., 2019. Influence of Managers' Subjective Judgments on Project Abandonment Decision Making. *International Journal of Information Technology and Decision Making*, 18 (2): 419-443. <https://doi.org/10.1142/S0219622018500529>

Long X., Nasiry J., Wu Y., 2020. A Behavioral Study on Abandonment Decisions in Multistage Projects. *Management Science*, 66 (5): 1999-2016. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2018.3270>

Marques N. L., Bastian-Pinto C. L., Brandão L. E. T., 2021. A Tutorial for Modeling Real Options Lattices from Project Cash Flows. *Revista de Administração Contemporânea*, 25: e200093. <https://doi.org/10.1590/1982-7849rac2021200093>

Miranda O., Brandão L. E., Lazo J. L., 2017. A Dynamic Model for Valuing Flexible Mining Exploration Projects under

- Uncertainty. Resources Policy, 52: 393-404. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.04.002>
- Moody's, 2021. Spread. <https://www.moodys.com>
- Morgan J. P., 2021. Emerging Markets Bond Index. <https://www.jpmorgan.com/global>
- Munis R. A., Martins J. C., Camargo D. A., Simões D., 2022. Dynamics of *Pinus* Wood Prices for Different Timber Assortments: Comparison of Stochastic Processes. Bois et Forêts des Tropiques, 351: 45-52. <https://doi.org/10.19182/bft2022.353.a36818>
- Nunes L. E., de Lima M. V. A., Davison M., da S. Leite A. L., 2021. Switch and Defer Option in Renewable Energy Projects: Evidences from Brazil. Energy, 231: 120972. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120972>
- Palisade Corporation, 2022. @Risk. Ithaca, NY, USA. <https://www.palisade-br.com>
- Ragozzino R., Reuer J., Trigeorgis L., 2016. Real Options in Strategy and Finance: Current Gaps and Future Linkages. Academy of Management Perspectives, 30 (4): 428-440. <https://www.jstor.org/stable/44645051>
- S&P Global Timber & Forestry Index, 2021. Overview. SPG. <https://www.spglobal.com/spdji/en/indices/equity/sp-global-timber-and-forestry-index/#overview>
- dos Santos H. G., Jacomine P. K. T., dos Anjos L. H. C., de Oliveira V. Á., Lumbreras J. F., Coelho M. R., et al., 2018. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Embrapa Solos. 5nd ed. Brasília, Brasil, EMBRAPA. <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1094003/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos>
- Sauter P. A., Mußhoff O., Möhring B., Wilhelm S., 2016. Faustmann vs. Real Options Theory – An Experimental Investigation of Foresters' Harvesting Decisions. Journal of Forest Economics, 24: 1-20. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfe.2016.01.004>
- Soliño M., Yu T., Alía R., Auñón F., Bravo-Oviedo A., Chambel M. R., et al., 2018. Resin-Tapped Pine Forests in Spain: Ecological Diversity and Economic Valuation. Science of the Total Environment, 625: 1146-1155. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.027>
- Syncopation Software, 2022. DPL – Decision Programming Language. Concord. <https://www.syncopation.com/>
- Trigeorgis L., Reuer J. J., 2017. Real Options Theory in Strategic Management. Strategic Management Journal, 38: 42-63. <https://doi.org/10.1002/smj.2593>
- Tschulkow M., Compennolle T., Van Passel S., 2021. Optimal Timing of Multiple Investment Decisions in a Wood Value Chain: A Real Options Approach. Journal of Environmental Management, 290: 112590. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112590>
- United States Department of the Treasury, 2021. Daily Treasury Yield Curve Rates. <https://www.treasury.gov/resource-center/data-chart-center/interest-rates/Pages/TextView.aspx?data=yield>
- Vo V. L., Le H. T. T., 2017. Strategic Growth Option, Uncertainty, and R&D Investment. International Review of Financial Analysis, 51: 16-24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.irfa.2017.03.002>
- Zastocki D., Kaliszewski A., 2021. Costs Incurred by the State Forests for the Selected Tasks in the Field of Seed Production and Selection, and Silviculture Carried out by Private Forestry Companies. SYLWAN, 165 (10): 703-715.

### Simões et al. – Author's contributions

Contributor role	Contributor names
Conceptualization	D. Simões
Data Management	Q. S. Rocha, R. A. Munis
Formal Analysis	Q. S. Rocha, R. A. Munis
Acquisition of funding	D. Simões
Survey and Investigation	D. Simões
Methodology	Q. S. Rocha, R. A. Munis, D. Simões
Project management	D. Simões, Q. S. Rocha
Resources	D. Simões
Software	Q. S. Rocha, R. A. Munis
Supervision	D. Simões
Validation	D. Simões
Visualization	Q. S. Rocha, R. A. Munis
Writing – Preparing the original draft	Q. S. Rocha, R. A. Munis, G. C. Garcia
Writing – Reviewing and editing	Q. S. Rocha, R. B. G. Silva, D. Simões

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

# Wind safety of rubber trees in plantations: methodological analysis of bending experiments on inclined standing trees

Arnauld Clauvy's ENGONGA EDZANG<sup>1,2</sup>

Benjamin NIEZ<sup>1</sup>

Lucie HEIM<sup>1,3</sup>

Thierry FOURCAUD<sup>4,5</sup>

Joseph GRIL<sup>1,2</sup>

Bruno MOULIA<sup>1</sup>

Éric BADEL<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Clermont Auvergne,  
INRAE, PIAF  
63000 Clermont-Ferrand  
France

<sup>2</sup> Université Clermont Auvergne, CNRS,  
Clermont Auvergne INP, Institut Pascal  
63000 Clermont-Ferrand  
France

<sup>3</sup> Arts et Métiers Institute of Technology  
LABOMAP, HESAM Université  
71250 Cluny  
France

<sup>4</sup> CIRAD, UMR AMAP  
34398 Montpellier  
France

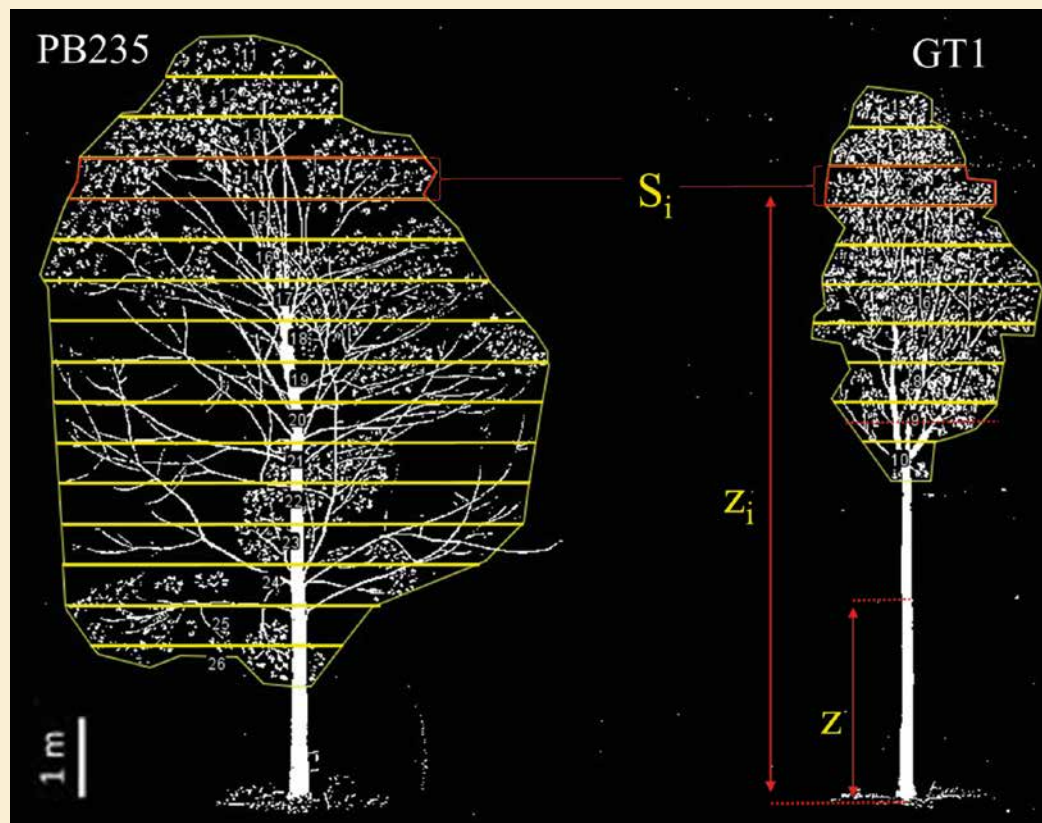
<sup>5</sup> AMAP, Univ Montpellier, CIRAD, CNRS,  
INRAE, IRD  
Montpellier  
FRANCE

**Auteur correspondant /**

**Corresponding author:**

Arnauld Clauvy's ENGONGA EDZANG –

[arnauld.engonga-edzang@inrae.fr](mailto:arnauld.engonga-edzang@inrae.fr)



**Figure 1.**

Drawings of the architecture of two rubber clones (Cilas *et al.*, 2004). PB235 (left) had a height of 9.7 m against 9 m for GT1 (right). After image segmentation, regular subdivisions of the crown surface  $S_i$  are defined for the computation of the bending moment due to the effect of the wind. Each subdivision has the same vertical thickness and its  $S_i$  area.  $Z_i$  refers to the height of the subdivision.

Doi : 10.19182/bft2022.354.a36912 – Droit d'auteur © 2022, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 9 avril 2022 ; date d'acceptation : 18 août 2022 ; date de publication : 1<sup>er</sup> décembre 2022.



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

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

Engonga Edzang A. C., Niez B., Heim L., Fourcaud T., Gril J., Moulia B., Badel É., 2022. Wind safety of rubber trees in plantations: methodological analysis of bending experiments on inclined standing trees. Bois et Forêts des Tropiques, 354 : 65-77. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2022.354.a36912>

## RÉSUMÉ

### Sécurité des hévéas en plantations face au vent : analyse méthodologique d'expériences de flexion sur des arbres sur pied inclinés

En raison de sa capacité à produire du latex pour des applications industrielles, l'hévéa est cultivé de manière intensive en grandes plantations. Le latex est récolté par saignée de l'écorce, ce qui génère un puits de carbone qui nuit à la croissance secondaire de l'arbre et par conséquent affaiblit la résistance mécanique du tronc. Afin d'étudier la vulnérabilité des clones d'hévéa à la rupture par le vent, nous proposons un modèle mécanique complet qui met en lumière les différents paramètres morphologiques et mécaniques impliqués dans la résistance du tronc en cas de vent fort. Le modèle nécessite des données expérimentales issues de la description structurelle de l'arbre et d'essais de flexion non destructifs réalisés *in situ* dans les plantations. Les résultats permettent d'obtenir une liste des paramètres requis et d'indiquer leur importance relative pour l'estimation du comportement mécanique des hévéas, afin de pouvoir comparer les clones à des fins de sélection.

**Mots-clés :** hévéa, clone, rupture par le vent, flexion des arbres, Côte d'Ivoire.

## ABSTRACT

### Wind safety of rubber trees in plantations: methodological analysis of bending experiments on inclined standing trees

Because of their ability to produce latex for industrial applications, rubber trees are grown intensively in large plantations. Latex is harvested by bleeding off the bark, generating a carbon sink for the tree that impairs its secondary growth and consequently weakens the mechanical resistance of the trunk. In order to study the sensitivity of rubber tree clones to wind breakage, we propose a complete mechanical model that sheds light on the different morphological and mechanical parameters involved in trunk resistance to strong wind events. The model requires experimental data that can be recorded from the structural description of a tree and from non-destructive bending tests performed *in situ* in plantations. The results provide the list of required parameters and indicate their relative importance for estimating the mechanical behaviour of rubber trees, with a view to comparing clones for breeding purposes.

**Keywords:** rubber tree, clone, wind breakage, tree bending, Côte d'Ivoire.

## RESUMEN

### Seguridad contra el viento de los árboles de caucho en las plantaciones: análisis metodológico de los experimentos de flexión en árboles inclinados en pie

Debido a su capacidad de producir látex para aplicaciones industriales, los árboles de caucho se cultivan de forma intensiva en extensas plantaciones. La recolección del látex se realiza mediante el sangrado de la corteza, lo que genera un sumidero de carbono para el árbol que perjudica su crecimiento secundario y, en consecuencia, debilita la resistencia mecánica del tronco. Para estudiar la sensibilidad de los clones de árbol de caucho a la rotura por viento, proponemos un modelo mecánico completo que proporciona información sobre los diferentes parámetros morfológicos y mecánicos implicados en la resistencia del tronco a los vientos fuertes. El modelo requiere datos experimentales que se pueden registrar a partir de la descripción estructural de un árbol y de ensayos de flexión no destructivos realizados *in situ* en las plantaciones. Los resultados proporcionan la lista de parámetros necesarios e indican su importancia relativa para estimar el comportamiento mecánico de los árboles de caucho, con vistas a comparar los clones con fines productivos.

**Palabras clave:** árbol del caucho, clon, rotura por el viento, flexión del árbol, Costa de Marfil.

## Introduction

Rubber tree is the almost exclusive source of natural rubber, which is mainly used by the tire industry, in combination with synthetic rubber, metal, and other ingredients. Cultivated in humid tropical environments, it makes 15 million hectares and produces 13 million tons of rubber per year<sup>1</sup>. Asia alone accounts for 89% of world production, mainly Thailand, Indonesia and Vietnam, while Africa (mainly Ivory Coast) and South America (mainly Brasil and Guatemala) account for 8% and 3% of rubber production, respectively.

Rubber plantations are often monoclonal (Masson and Monteuis, 2017), with seedling selection based on multiple criteria such as growth speed, tree productivity and its physiological indicators, tapped stand resilience along time, tolerance to abiotic stress such as tapping panel dryness and tolerance to fungus leaf diseases (Gohet *et al.*, 1996; Clément-Demange *et al.*, 2007). However, growers and breeders do not have relevant criteria to estimate the wind breakage sensitivity of trees, and to preventively improve their mechanical resistance.

Indeed, during their economic life in plantation, rubber trees are susceptible to wind damage and especially to trunk breakage (Nicolas, 1979; Fourcaud *et al.*, 1998). However, planters observe a great variability between the different clones. This sensitivity to wind limits the rubber growing areas to regions that do not regularly experience cyclones or typhoons. Even so, wind breakage remains a major issue that reduces the lifespan of the stands and affects farmers' income, with losses in latex production which can get as high as 30% or more in some cases (Clément-Demange *et al.*, 1995). Moreover, two types of wind damage are typically reported by planters in rubber plantations: i) massive tree falls linked to more exceptional events such as big storms, but also ii) regular and local tree breakage under moderate wind storms, which causes continuous annual erosion of the plantation density. The current context of climatic disturbances (Liu *et al.*, 2019; Vecchi *et al.*, 2019) could make the situation even more critical by endangering rubber plantations.

Knowledge of the biomechanical factors and mechanisms related to the breakage of trees because of the wind has greatly progressed during the last decades (Peltola, 2006; Fournier *et al.*, 2013; Gardiner *et al.*, 2016). Experimental and numerical studies allowed disentangling the relative contributions of tree architecture, including the root system, and wood material properties on the biomechanical response to high winds (Sellier and Fourcaud, 2005, 2009; Yang *et al.*, 2017). In particular, the longitudinal distribution of secondary growth along the trunk and the major roots, and the way it is linked to the kinetics of crown development (Bossu *et al.*, 2018) was shown to be a central parameter of trunk breakage sensitivity (Ancelin *et al.*, 2004; Alméras and Fournier, 2009).

To date, several hypotheses have been put forward to explain the sensitivity of rubber clones to wind breakage, including competition between latex production and

growth (Watson, 1989; Gohet *et al.*, 1996; Silpi *et al.*, 2006), crown shape (Combe and du Plessix, 1974; Fourcaud *et al.*, 1999; Milet, 2001) or the presence of tension wood (Nicolas, 1979). In tapped rubber trees, the intense and repeated latex production induced by tapping strongly affects the tree's biological activity, particularly the primary and secondary growths. Tapping reduces radial growth of trees by about 50% after only the second week of latex harvesting (Fourcaud *et al.*, 1998), while growth in height is also slightly affected by tapping. Altogether, growth responses result in a decrease of the ratio between radial and height growth. The architecture of the crown is also involved in the trunk breakage phenomena of rubber clones. The shape and branching typology of the crown is very important in wind-break because it contributes to the mechanical moment resulting from wind drag and self-weight (Petty and Swain, 1985), as well as to the structural damping of the tree (Sellier and Fourcaud, 2005, 2009). Considering rubber trees, some clones, known to be susceptible to breakage, are characterized by forked and heavy crown (e.g. RRIM600), or by a continuous growth of the primary axis (e.g. PB235) and in other cases long, heterogeneous and persistent secondary ramifications. In contrast, resistant clones (such as PR107 or PB217) are characterized by i) a balanced crown, ii) a limited growth of the primary axis, and iii) numerous, short, homogeneous ramifications, which naturally pruning (Hofmann, 1984; Compagnon, 1986; Milet, 2001). The intrinsic properties of wood formed in trunks were also studied (CIRAD, 1990). The presence of tension wood appears to play an important role in the susceptibility of clones to breakage. This reaction wood, which is anatomically different from "normal" wood, is produced by angiosperm hardwood trees in order to control their orientation, e.g., to keep their straight vertical posture in the face of mechanical stresses (Scurfield, 1973; Donaldson and Singh, 2016). Nicolas (1979) investigated the presence of tension wood in 10 clones and showed that the most sensitive clones to wind breakage were also those that contained the highest proportion of tension wood. Finally, a peculiar morphological feature of most rubber tree clones worldwide is to develop an anemomorphic shape over time, with a tilted trunk and a crown that is curved downwind (Wang *et al.*, 2019). It is not clear whether this trait is adaptive by reducing the wind drag over the tree or detrimental by increasing the overturning moment on the trunk due to the weight of the crown.

In this article, we propose a methodology to evaluate the wind resistance of rubber tree clones with contrasting architectures and having the particularity to grow in an inclined manner. First, a static approach is proposed for studying the wind load over real trees. It is based on the estimation of wind drag forces from image analysis, taking into account tree crown architecture. This information is then integrated in mechanical model equations for a final calculation of the drag force and bending moment.

In a second stage, a simple theoretical model for evaluating the basic mechanical characteristics of standing

<sup>1</sup> <https://www.rubberstudy.org/>

rubber clones is presented. It can be used to estimate the bending stiffness of the trunk and the modulus of elasticity of its wood, as well as the maximal bending stress in the trunk (related to its risk of breakage).

The parameters required for this model can be estimated using a controlled bending test that can be performed in situ in the plantation. In this case, the static load (bending moment) differs from the load induced by wind drag and is modelled from simple measurements.

Finally, the maximal bending stress that occurs in the trunk of the tree for a typical wind storm can be calculated (as this is the trait that may trigger stem breakage), and different clones can be compared for their level of mechanical stress during wind storm. Besides, if the strength of wood is known, then the safety factor of each tree form trunk breakage can be estimated.

A practical application was performed using data provided from previous pulling tests carried out in 1997 on two rubber tree clones in Ivory Coast plantations. These two clones were selected because of their contrasted mechanical sensitivity to wind breakage during strong windy events: the PB235 clone is known as very susceptible to wind breakage, whereas GT1 clone is considered as more resistant to wind breakage, at least in the young age (Obouayeba *et al.*, 2012).

The objective of this case study is to give an overview of the mechanical information that can be extracted from such experimental data. We highlight all the parameters that are necessary for data analysis, even if the small number of experimental tests performed and the absence of some data did not allow to provide a robust statistical anal-

ysis and are principally described for illustrative purpose. Finally, the importance of crown weight and of tree tilt and crown curvature in the calculation of the bending moment is discussed.

## Material and methods

### Estimation of the wind drag force and the wind-induced bending moment in the trunk by image analysis

The analysis of the tree's behaviour in the wind requires knowledge of the action of the wind on the tree, i.e., the drag force. The aim of this section is to present a method to evaluate this action on the studied trees. The method is based on a scaled description of the crown morphology and the knowledge of a theoretical wind profile. The crown morphology can be obtained using representative photographs. But it can be also obtained by accurate drawings. This is the case illustrated in figure 1 using published drawing representing the two rubber clones, PB235 and GT1, by Cilas *et al.* (2004). The method presented here aims at comparing the drag force and the resulting bending moment that the trees could experience for the same given wind profile.

The method follows five main steps (figure 1):

- First, the initial drawing is converted into an 8 bit-grey image and segmented in order to get a binary image that distinguishes the tree structure (branches, leaves) from the porosity.
- The boundary of the tree crown is drawn. This defines the total crown area  $S$ , perpendicular to the wind direction.

- This surface  $S$  is then divided into  $n$  horizontal slices, 50 centimeters thick each. The number  $n$  of slices depends on the total thickness of the crown (figure 1).

- For each slice, the area  $S_i$ , leaf density  $d_i$  and the height  $z_i$  of the centre of mass are measured. The leaf density  $d_i$  is computed as the percentage of the area corresponding to non-null pixels i.e. white pixels. So that,  $d_i.S_i$  stands for the effective area of the slice.

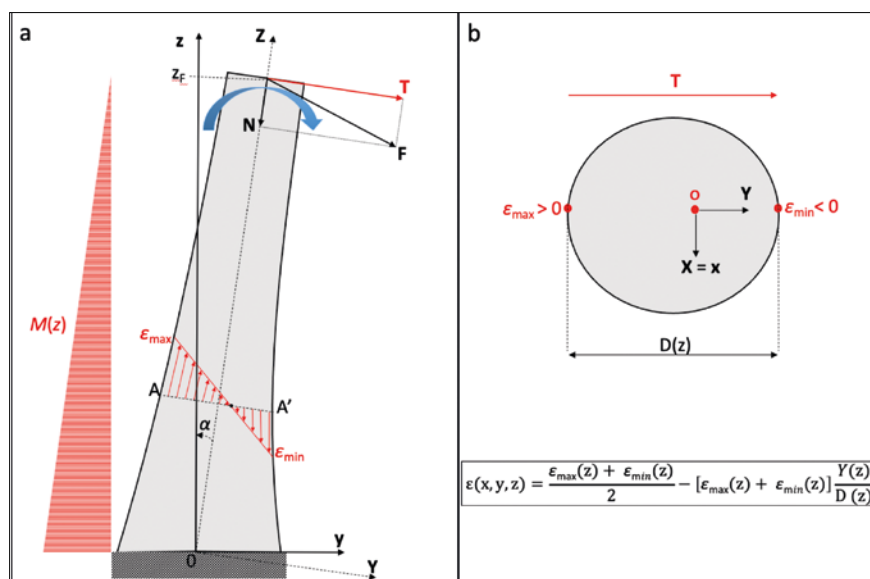
In the case of a given wind profile  $U(z)$ , the local force  $F_i$  applied by the wind on each slice is estimated as:

$$F_i = \left(\frac{1}{2}\right) \rho_{\text{air}} U_i^2 c_d d_i S_i \text{ with } i \in \llbracket 1;n \rrbracket \quad (1)$$

where  $U_i = U(z_i)$  stands for the local wind velocity ( $\text{m.s}^{-1}$ ),  $\rho_{\text{air}}$  the air density and  $c_d$  is the drag coefficient we fixed at 0.2 in the following calculations, as indicated to Stuttgart table (Brudi *et van Wassenaer*, 2002).

Finally, the local bending moment  $M_i$  due to the interception of the wind by each of these subdivisions  $S_i$  is computed as:

$$M_i(z) = F_i (z_i - z) \text{ with } i \in \llbracket 1;n \rrbracket \quad (2)$$



**Figure 2.**

Simplified mechanical model of a tree trunk under externally applied bending: a. Longitudinal section of a trunk. b. Circular cross-section (A-A') of the trunk. The loading results from a force  $F$  applied at point  $z_f$  and have two components: the force  $N$  that is normal to the cross section and the shear force  $T$  (red arrow).  $T$  generates a bending moment  $M(z)$  (red hatched triangle) that induces a rotation of the cross-sections and a local mechanical field of longitudinal deformations  $\epsilon(x,y,z)$  in the cross section. The initial inclination of the tree at the base is  $\alpha$ . For a given altitude  $z$ , the longitudinal strain varies linearly from the pith ( $\epsilon = 0$ ) to the periphery of the trunk where the strain is maximal (for  $y = D/2$ ).

where  $z$  is the critical point of interest of the trunk (trunk collar for instance,  $z = 0$ ) where the bending moment is analysed. The total bending moment  $M(z)$  induced by the drag forces and applied to the trunk of the tree is computed as the sum of these local bending moments  $M_i$ :

$$M(z) = \sum_{i \in \llbracket 1, n \rrbracket} M_i(z) \quad (3)$$

The above-mentioned computation was performed using ImageJ software (figure 1).

Note that this wind-drag model neglects the crown reconfigurations that occurs when the crown is submitted to high winds (Gardiner *et al.*, 2016). These reconfigurations reduce the front area of the crown  $S$  as well as the drag coefficient  $c_d$  (through branch streamlining). However, we have no data for this for rubber trees in plantations. Nevertheless, the estimate of the bending moment given by equation (3) can be considered as an upper-bound estimate, which makes sense in the view of assessing wind firmness and plantation security.

Once the bending moment along the trunk resulting from wind drag over the crown has been obtained, the next step is two estimate the flexural rigidity of the trunk and the stress that bending can create. This can be achieved through a theoretical bending model.

### Modelling of trunk bending

The following model is primarily designed to analyse a pulling test used to estimate the bending rigidity of the trunk, but will also lead to a stress analysis applicable to the effect of wind. The tree stem is described as a straight, near-vertical beam embedded at its basis and free to move at its top (figure 2a). The cross section is assumed to be circular along the length of the beam with a decreasing diameter  $D(z)$  (figure 2b).

Rubber trees in plantations often show a small initial deviation from verticality that is due to the direction of dominant wind. This inclination is characterized by the angle  $\alpha$  between the direction of the trunk  $Z$  and the vertical direction  $z$  (figure 2). A load  $F$  is applied at height  $z_f$  on the trunk. The force is applied in the plane  $(y,z)$ , either in the direction of the initial inclination  $\alpha$  or opposite to it, and its direction makes the angle  $\beta$  with the horizontal direction. The cross section situated at height  $z < z_f$  is subjected to a normal load  $N$  and a bending moment  $M$  given by:

$$N = F \cdot \sin(\beta - \alpha) \quad ; \quad M = F \cdot \cos(\beta - \alpha) \cdot [z_f - z] / \cos \alpha \quad (4)$$

According to Euler-Bernoulli's theory for slender beams, the distribution of axial strain  $\varepsilon$  within the cross section is a linear function of the position  $Y$  relative to the plane  $(x,Z)$ :

$$\varepsilon = \delta\varepsilon - \Delta\varepsilon \cdot (2Y/D) \quad (5)$$

where  $\delta\varepsilon$  is the average strain and  $\Delta\varepsilon$  the differential strain between the inner and outer sides of the trunk. At mechanical equilibrium, and assuming a cross-section made of an homogeneous elastic material of Young's modulus  $E$ ,  $\delta\varepsilon$  and  $\Delta\varepsilon$  can be related to the normal load  $N$  and the bending

moment  $M$  through the following relationships:

$$\begin{aligned} \delta\varepsilon &= N / (E \cdot S) \\ \Delta\varepsilon &= M \cdot D / (E \cdot J) \\ E &= M \cdot D / (J \cdot \Delta\varepsilon) \quad (6) \end{aligned}$$

$S = \pi D^2/4$  being the surface area of the circular cross section and  $J = \pi D^4/64$  its second moment of area. From equation (4) and (6) the ratio  $\delta\varepsilon/\Delta\varepsilon$  can be derived:

$$\delta\varepsilon / \Delta\varepsilon = [D / (z_f - z)] \cdot \tan(\beta - \alpha) \cdot \cos \alpha / 64 \quad (7)$$

showing that, except for an anchoring position close to the tree collar (small  $\beta - \alpha$ ) or a cross section close to the force application point ( $z_f - z < D$ ),  $\delta\varepsilon$  can be neglected and  $\varepsilon$  varies from  $-\Delta\varepsilon/2$  on the compressive face ( $Y = +D/2$ ) to  $+\Delta\varepsilon/2$  on the tensile face ( $Y = -D/2$ ). Then, the peripheral longitudinal stress, given by  $-\sigma$  and  $+\sigma$ , respectively, comes as:

$$\sigma = M \cdot D / (2 \cdot J) \quad (8)$$

Note that equation (8) would also apply to the case of a wind-induced bending moment  $M$  such as given by equation (3). In both cases the mechanical stress  $\sigma$  can be compared to the breaking stress (material strength)  $\sigma_r$  leading to wood rupture estimated for these genotypes and which can be estimated by conducting a bending test up to stem rupture or by direct assessment on (green) wood sample using a testing machine. The safety factor ( $SF$ ) comes as:

$$SF = \sigma_r / \sigma \quad (9)$$

$SF$  characterizes the wind firmness; the higher is  $SF$ , the safer the tree with respect to its trunk. As a remark, these estimations of  $\sigma$  and  $\sigma_r$  do not take into account the nonlinear response that precedes failure. In the case of  $\sigma_r$ , the pre-existing growth stress distribution should be also taken into account, especially in the case of tension wood occurrence (Gril *et al.*, 2017).

### Field experiments: Bending of standing trees

#### Plant material

The tests were carried out in Ivory Coast, in the experimental part of the Anguededou rubber tree plantation depending on the CNRA research center of Bimbresso, near the road from Abidjan to Dabou (5° 18' 53.3" N 4° 09' 19.8" W). In this location, the soils are made of very deep tertiary sand, which makes possible a deep growth of the tap-roots of the trees, and therefore very little uprooting by wind. Wind damage is here predominantly the result of trunk breakage.

Nine rubber trees were selected in 3 different plots: 5 trees of the PB 235 clone and 4 trees of the GT1 clone; 3 trees were tapped for 2 years, and 6 trees for 5 years. The trees were 7 to 11 years old and were selected from 4 different plots. The diameter of trees at 1.30 m height ranged from 16.2 to 24.2 cm, i.e. from 51 to 76 cm in girth (table I). The total height varied in the range 20-25 m. The height of insertion on the trunk of the lowest branch was around 8 m. The initial inclination of the trees was about 1 to 7° (table I) in the direction of prevailing winds.

**Table 1.**

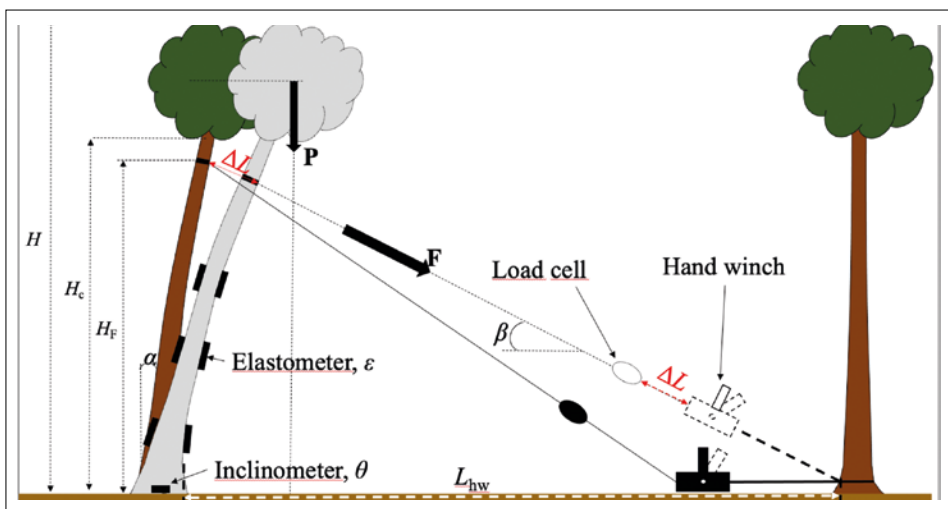
Characteristics of the different tested trees. The trees were 7 or 11 years old, had 2 or 5 years of tapping, and an initial inclination of 1 to 7° in the direction of the prevailing wind.

Tree number	Clone	Plot	Age	Nb tapped years	Diameter at 1.3 m (cm)	Initial inclination (°)	Trunk weight (kg)	Branch + leaf weight (kg)
1	PB235	1	11	5	17.5	5.3	153.0	180.5
2	PB235	1	11	5	17.7	3.4	173.6	177.9
3	PB235	2	7	2	20.7	1.3	257.6	228.5
4	PB235	2	7	2	16.6	3.0	194.2	106.5
5	PB235	1	11	5	24.2	3.6		
6	GT1	2	7	2	16.2	4.8	104.0	125.5
7	GT1	3	11	5	20.5	2.9		
8	GT1	3	11	5	23.6	3.2		
9	GT1	3	11	5	17.5	3.1		

### Experimental design of the in situ bending test

Bending tests were carried out between 10 and 30 July 1997. These tests aimed at characterizing and comparing the mechanical response to bending of PB235 and GT1 clones. The total height of the tree  $H$ , the height  $H_f = z_c$  at the point of attachment of the cable to the trunk, the initial inclination of the trunk  $\alpha$  and the angle of the cable with the horizontal  $\beta$ , the distance from the trunk to the point of attachment of the tree  $L_{hw}$  were measured before the bending experiments (cf. figure 3). In addition, girth was recorded at different heights: first at 0.3 m height and then every 1 m up to the height of application of the force.

The force applied during loading was measured using a dynamometer with a maximum capacity of 10 kN. During the experiments, a hand winch was used to pull the tree. The transducers data and the length of the cable pulled were recorded at each loading step. All trees were pulled both in the direction of the natural inclination and opposite to it. For trees n° 1, 2, 6, and 9 (two trees per clone), the test was then repeated along the inclination and brought up to tree failure. The failure force and the failure height of the tree were noted at the end of the bending test. For the trees n° 1, 2, 3, 4 and 6 (table 1), after each bending test, the trees were felled and split into three parts: trunk, branches and leaves. Each part was individually weighed.

**Figure 3.**

Principle of a trunk-bending test.  $H$ : total height of the tree.  $H_c$ : height of crown base.  $H_f = z_c$ : height at wire rope fixation point on the tree.  $\alpha$ : initial tree inclination at the base.  $\beta$ : angle of cable with the horizontal.  $L_{hw}$ : distance from the tree to the anchoring point of the hand winch at base of neighbouring tree.  $\epsilon$ : strain measured by the elastometer.  $\theta$ : inclination of root-soil system measured by the inclinometer.  $F$ : force applied by the hand winch.  $P$ : crown weight.  $\Delta L$ : shortening of cable length.

Strain sensors were installed at five different heights along the stem (0.3, 1.3, 2.3, 3.3, 4.3 m). For each height, one sensor was fixed on the part of the trunk under compression and a second was fixed on the part under tension. The design of the strain sensor (figure 4) was inspired by the sensors developed by Blackburn (1997) and described in Moore *et al.* (2005). The contraction (resp. stretching out) of the wood fibres generates a length variation between two lever arms, which generates the bending of the thin central part of the sensor. A strain gauge was glued on this thin zone to evaluate the corresponding bending. A second gauge was fixed to the sensor to provide temperature compensation without being subjected to mechanical strains (figure 4).

The force applied during loading was measured using a dynamometer with a maximum capacity of 10 kN. During the experiments, a hand winch was used to pull the tree. The transducers data and the length of the cable pulled were recorded at each loading step. All trees were pulled both in the direction of the natural inclination and opposite to it. For trees n° 1, 2, 6, and 9 (two trees per clone), the test was then repeated along the inclination and brought up to tree failure. The failure force and the failure height of the tree were noted at the end of the bending test. For the trees n° 1, 2, 3, 4 and 6 (table 1), after each bending test, the trees were felled and split into three parts: trunk, branches and leaves. Each part was individually weighed.

### Estimation of the bending moment on the trunk during the bending tests

Mechanical analyses of pulling tests were carried out using recorded data (i.e. incremental strains, inclination angles, etc.) in the theoretical model described above. The bending moment  $M$  was computed at the location of strain gages and each pulling step using equation (4b), the longitudinal Young's modulus  $E$  was obtained using equation (6), and the bending stiffness was defined as the product  $EJ$ . Using these parameters, the theoretical model of stem bending can now be coupled with the model for estimating wind drag in storm conditions and the resulting bending moment. Then the maximal stress under such winds can be estimated and compared between clones.



## Results and discussion

### Estimation of the drag forces and the resulting bending moment

The vertical profile of wind speed  $U(z)$  depends on the roughness of the canopy and can be experimentally measured in situ. Since we lacked such experimental data, we chose a realistic model depicted in the literature. Data and models of the wind vertical profile in the specific case of rubber tree plantation are lacking. Moreover, their extrapolation from wind models in forests is not straightforward, because the rubber tree plantation is less dense. Therefore we considered the situation where the static wind load on the tree is maximal, that is when the tree is sitting on the canopy edge facing a clear land surface windward (e.g. when the upwind plot has been clear-cut). In such case with an upwind surface with a roughness near zero, the wind profile can be modelled as a logarithmic curve (Gardiner *et al.*, 2016):

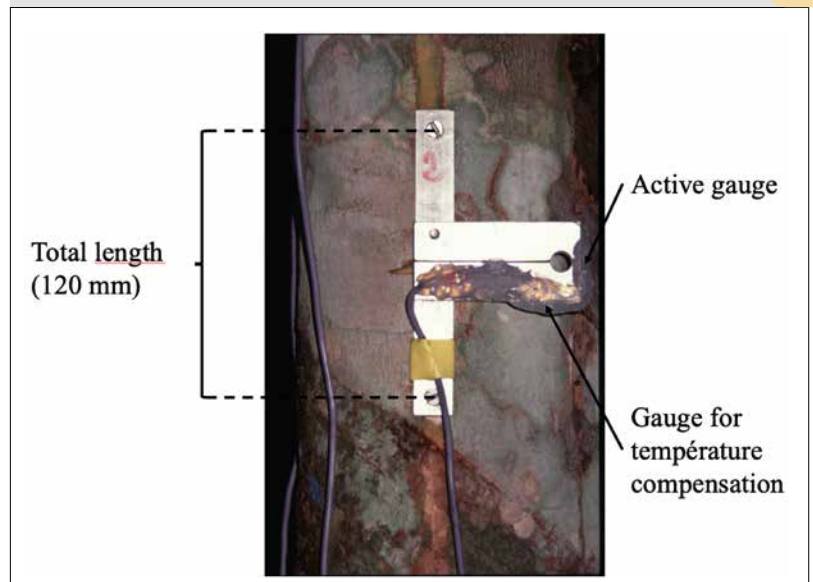
$$U(z) = \frac{U_{10}}{\ln(z_0 * K)} * \ln(z) \quad (10)$$

where  $U_{10}$  is equal to 33,3 m.s<sup>-1</sup>, namely 120 km.h<sup>-1</sup>, and stands for the velocity of wind of grade 12 on the Beaufort scale (higher grade). This velocity is assumed to be measured at 10 m high as indicated in the Eurocode 1-part 4 for the velocities of the reference wind on opened fields.  $K$  is the Von Karman constant and  $z_0$  stands for the length of roughness and is assumed equal to 0.01 m (Cook, 2007; Gardiner *et al.*, 2016).

Using these windy conditions, we used equations 1 to 3 to evaluate the drag force at each height and the resulting bending moment applied to the trunk. We computed this bending moment for both clones by taking into account their specific architecture, shown in figure 1. As can be seen, PB235 and GT1 clones displayed almost identical heights (9.7 m for PB235 and 9 m for GT1), but very different crown sizes and shape. Overall, the front area of the crown of PB235 was 4.2 times higher than that of GT1 (39.5 m<sup>2</sup> vs 9.5 m<sup>2</sup>). The computations showed that the bending moment at the trunk basis (1-meter-high) of the PB235 clone was 72% higher than for the GT1, with values of 271 N.m and 464 N.m, respectively. This is substantially higher but far less than the difference in the front area. This is because GT1 had a narrower crown that was gathered in its upper part (where wind drag is higher and lever arms are maximal) while PB235 had a wider crown but more evenly distributed over its height.

### Mechanical behaviour of rubber tree trunks

The results presented in table II were computed thanks to the strain measurement performed at 1.3 m high and all the equations described in the previous section for clones PB235 and GT1. The values in brackets in the fourth column of the table correspond to the average value of the five moduli calculated from the deformation measurements



**Figure 4.** Strain sensor screwed in the wood during the bending tests of the trunk (© T. Fourcaud).

over the five heights (0.3, 1.3, 2.3, 3.3 and 4.3 m). The low number of fully documented experimental tests did not allow for providing a robust statistical analysis. However, a few parameters can be discussed. First, the mechanical tests enlightened a slightly (but significant) higher bending rigidity for the PB235 clone. Theoretically, this parameter is the combination of the dimensions of the cross-section and the Young's modulus of the wood material. In our case, the analysis of the strain vs force curves indicated a large difference in term of Young's modulus: PB235 showed a higher average elastic modulus (+ 31%) than GT1 with values equal to 7.4 GPa and 5.1 GPa respectively.

### Comparison of the wind susceptibility of the two rubber tree clones

The two clones were selected based on their known contrasting sensitivity to wind. While both clones had the same age and trunk diameter, the full analysis of the experimental data, coupled with mechanical modelling, revealed a strong difference in longitudinal elastic modulus between the clones. PB235 had a much higher Young's modulus ( $p$ -value = 0.012), which resulted in higher bending stiffness of the trunk and thus lower stem deformations for a given force. However, the wider crown of the PB235 drastically increased the area of wind interception, the drag force and the resulting bending moment applied to the trunk. Based on these results, we were able to estimate the maximum stress that the trunk could be subjected to under the wind conditions described in Section 2.1. The calculations indicated that the maximum stress induced by the wind drag was higher for PB235 than for GT1 (0.69 MPa for PB235 and

**Table II.**

Results of bending tests for PB235 and GT1 rubber clones. The values in brackets for the MOE correspond to the average value of the five moduli calculated from the deformation measurements over the five heights. The failure stress is estimated according to equation 8. Empty cells indicate missing data. Stars indicate the statistical difference between PB235 and GT1 clones. (\*:  $p < 0.05$ ) (Student T-test).

Tree number	Clone	Bending rigidity, $EJ$ ( $\text{kN/m}^2$ )*	Average MOE, $E$ (GPa)*	Failure force (kN)	Bending moment at failure, $M$ (kN/m)	Failure stress at 1.3 m, $\sigma_{\text{max}}$ (MPa)	Failure height (m)
1	PB235	359.7	7.8	5.69	22.08	41.92	1.3
2	PB235	368.2	7.7	4.71	18.06	33.37	0.71
5	PB235	638.7	7.1				
7	PB235	265.3	7.2				
8	PB235	907.9	5.4				
6	GT1			5.30	20.47	48.73	1
9	GT1	505.9	5.8				
10	GT1	725.3	4.8				
11	GT1	244.4	5.3	5.89	22.74	43.17	1.6
Mean PB235		507.9	7.0	5.2	20.1	37.6	1.0
Standard deviation PB235		263.4	1.0	0.7	2.8	6.0	0.4
Mean GT1		491.9	5.3	5.6	21.6	46.0	1.3
Standard deviation GT1		240.8	0.5	0.4	1.6	3.9	0.4

0.4 MPa for GT1) for a similar trunk diameter of about 19 cm.

These values can be compared to the breaking stress (wood strength) leading to wood rupture at 1.3 m height estimated for these genotypes:  $\sigma_r$  (42 MPa for PB235, 46 MPa for GT1). This would lead to high safety factors  $SF$  against a grade 12 wind storm (120 km/h),  $SF = 61$  for PB235 and  $SF = 114$  for GT1, with GT1 being almost 2 times safer. However, these values have just an illustrative purpose: indeed, the values for wood strength  $\sigma_r$  were obtained for 1 or 2 trees per genotypes and the wind-drag estimation comes from mean crown shapes from another experiment (although from the same pedoclimatic area).

Consequently, it is essential to perform both analyses to correctly estimate the wind resistance of the trees: wind profile and tree crown architecture to determine the wind loads and the bending moment applied to the trunk; evaluation of wood mechanical behaviour through controlled bending tests and finally computation of safety factors.

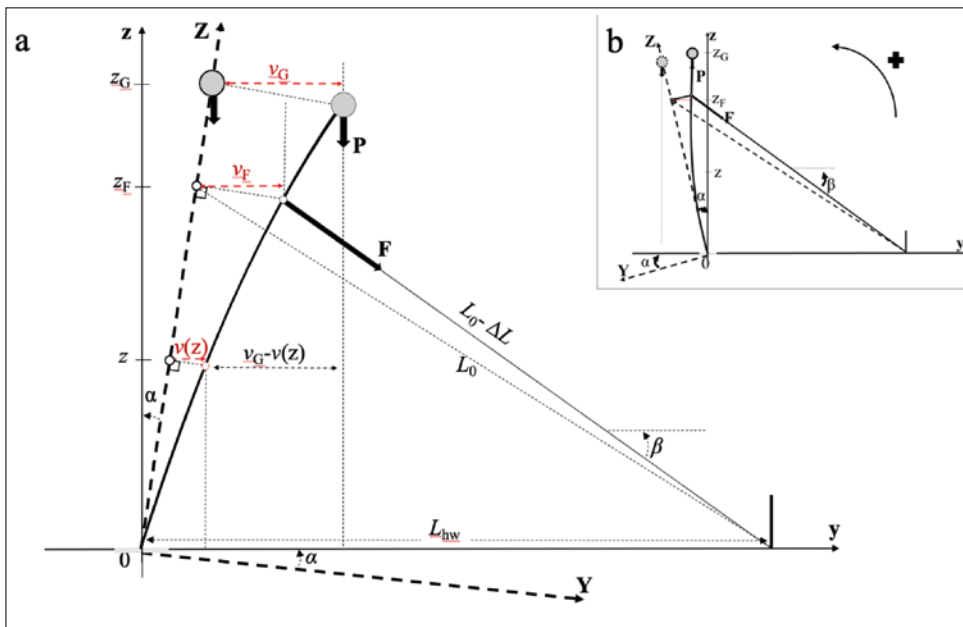
**Figure 5.**

Diagram of the bending test on standing tree. a. Bending in the direction of natural inclination of the tree. b. Bending in the opposite direction to natural inclination of tree.  $L_0$ : initial length of tensioned bending cable,  $(O, y, z)$  fixed reference frame and  $(O, Y, Z)$  rotating reference frame related to the tree inclination.  $v(z)$ : displacement of tree at position  $z$  in the  $(y, z)$  plane.  $v_F$ : displacement of the point of force application.  $v_G$ : displacement of the gravity centre of the crown.  $z_F$ : position of the point of force application.  $z_G$ : position of the gravity centre of the crown.  $\alpha$ : initial inclination of the tree at the base.  $\beta$ : angle of cable with the horizontal.  $L_{hw}$ : distance from the tree to the anchoring point of the hand winch at base of neighbouring tree.

### Estimation of the bending moment with consideration of the crown weight

The expression of  $M$  given by equation 4b is only valid for small perturbations of the system, characterized by small levels of  $v(z)$ , displacement of the cross-section along  $y$ -direction at height  $z$ . As soon as the trunk is significantly bent, additional contributions to  $M$  result from the modified geometry. In the case of wind loading, Ancelin *et al.* (2004) reported the impact of crown weight when the trunk bends. In the case of a standing tree bending test, Langbour (1989) proposed a model based on a direct but complex calculation. We propose here a simplified model based on the measurement of the cable shortening for the estimation of the effect of the crown weight. First, the normal component  $N$  contributes by

$\delta M_N = N [v_f - v(z)] / \cos \alpha$  where  $v_f = v(z_f)$ . Second, due to the movement of the part of the tree supported by the cross section, its weight  $P(z)$  contributes by  $\delta M_p = P(z) [v(z_g) - v(z)]$  where  $G(z)$  is its gravity center,  $z_g$  the height of  $G(z)$  and  $v(z_g)$  is its horizontal movement. For the determination of the position  $z_g$ , we assume that the masses of the different branches are distributed along the axis of the trunk and that they are added to the local mass of the trunk. Thus, using the masses of the different parts of the trunk and the masses of the different branches and their positions, we determine the position  $z_g$  from the following equation:

$$z_g = z_f + \frac{\sum_{z_i > z} g m_i \cdot z_i}{\sum g m_i} \quad (11)$$

The total bending moment  $M$  supported by the cross section becomes:

$$M = M_T + \delta M_N + \delta M_p \quad (12)$$

$$M = F \cdot \cos(\beta - \alpha) \cdot [z_f - z] / \cos \alpha + F \cdot \sin(\beta - \alpha) \cdot [v_f - v(z)] / \cos \alpha + P \cdot [v(z_g) - v(z)]$$

where  $M_T$  is the main component of the bending moment given by the equation 4b. Since  $v(z)$  depends on  $F$ , this formulation is implicit and its rigorous resolution is complex. However,  $\delta M_N$  and  $\delta M_p$  being second-order corrections, they can be approximated using a simplified tree model. If the trunk was homogeneous and perfectly cylindrical up to the force application point, and the upper part of the tree made of a weightless and rigid bar holding the concentrated weight  $P(z)$  at point  $G(z)$  (as shown in figure 5), the expression of  $v(z)$  could be simply written as:

$$v(z) = v_f \cdot [2 - (3/2) \cdot (z/z_f)^2 + (1/2) \cdot (z/z_f)^3] \text{ for } 0 < z < z_f \quad (13)$$

$$v(z) = v_f \cdot (3/2) \cdot (z - z_f) / z_f \text{ for } z_f < z \quad (14)$$

This bending model does not take into account the deformation of the stem above the force application point, nor the reconfiguration of the crown. The displacement  $v_f$  can be obtained independently based on the variation of the rope length  $\Delta L = L - L_0$  and of the rope angle  $\Delta \beta = \beta - \beta_0$  where  $L_0$  and  $\beta_0$  are the initial value of rope length  $L$  and rope angle  $\beta$ , respectively (figure 5). Assuming small values of  $\Delta \beta$  and  $\Delta L/L_0$ , and replacing  $L_0 = z_f / \sin \beta_0$ , we can write:

$$L_{nw} - z_f \cdot \tan \alpha = L_0 \cdot \cos \beta_0 = v_f + (L_0 + \Delta L) \cdot \cos(\beta_0 + \Delta \beta) \\ \sim v_f + L_0 \cdot \cos \beta_0 + \Delta L \cdot \cos \beta_0 - z_f \cdot \Delta \beta \quad (15)$$

$$\Rightarrow v_f \sim -\Delta L \cdot \cos \beta_0 + z_f \cdot \Delta \beta$$

The estimation of  $P(z)$  and  $z_{G(z)}$  requires values of weight, dimensions and rough positioning of tree portions, that can be measured after tree felling. Based on such data, and using the relative horizontal displacement  $v(z)/v_f$  and  $v_g/v_f$  provided by equations 13 and 14, the total bending moment  $M$  can be calculated, and the local bending rigidity  $EJ$  or Young's modulus  $E$ , at the level of the cross-section  $z$ , derived from equation 6:

$$EJ = M \cdot D / \Delta \epsilon \quad (16)$$

$$E = M \cdot D / (J \cdot \Delta \epsilon) \quad (17)$$

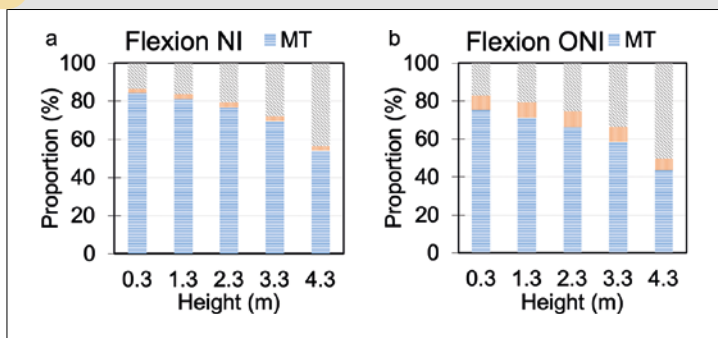
Note that in case of a bending test performed in the direction opposite to the initial natural inclination of the trunk, the previous equations (15) and (16) remain applicable, with a negative  $\alpha$  value (figure 5b).

This complete analysis could be applied in the case of one single bending experiment (tree 1, table I), where all the parameters needed were available. The objective here is to evaluate the contributions of the vertical component of the force  $F$  ( $\delta M_N$ ) and of the weight of the tree crown  $P$  ( $\delta M_p$ ), often neglected, to that of the horizontal component of the force  $F$  ( $M_T$ ) according to the equation 11. For this, in addition to the data of force evolution  $F$ , rope shortening  $\Delta L$  and rope angle  $\beta$ , we needed geometrical parameters such as: tree height, height at the base of the tree crown, height of the cable on the tree, distance from the tree to the anchor point of the lag bolt, natural inclination of the tree. We also need the mass of the trunk, the mass of the branches and the girth at different heights for the calculation of the position of the centre of mass.

The histograms in figure 6 present the proportions of  $M_T$ ,  $M_N$ , and  $M_p$  in the total moment  $M$  for different height levels (0.3, 1.3, 2.3, 3.3, and 4.3 m), in cases of bending in the direction of the natural inclination (NI) and in the direction opposite to the natural inclination (ONI). In case of NI bending,  $M_T$  represented more than 80% of the total moment  $M$  between heights 0.3 m and 1.3 m, while  $\delta M_N$  and  $\delta M_p$  contributed by only 2% and 18% to the total moment  $M$ , respectively, for the same height levels. Above 1.3 m, the relative influence of  $M_T$  decreased progressively (about 52% of  $M$  at 4.3 m) at the expense of  $\delta M_p$  that reached about 46% of the total bending moment  $M$  at 4.3 m. In case of ONI bending, the proportions of  $M_T$ ,  $\delta M_N$ , and  $\delta M_p$  were different.  $M_T$  represented only 70% of  $M$  between 0.3 and 1.3 m while  $\delta M_N$  and  $\delta M_p$  represented respectively 8% and 20% of  $M$  for the same height levels. Above 1.3 m, as, for NI bending, the proportion of  $M_T$  decreased considerably (only 44% of total  $M$  at 4.3 m) while the influence of  $\delta M_p$  increased (50% of total  $M$  at 4.3 m). The relative influence of  $\delta M_N$  remained low and almost stable with height in both bending cases. Between 0.3 and 4.3 m, the influence of  $\delta M_N$  decreased from only 1.7% to 1.5% for NI bending and from 8% to 6% for ONI bending.

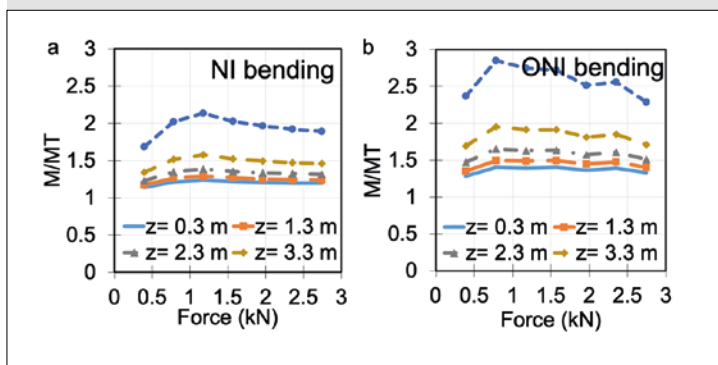
In conclusion, the closer to force application point, the higher is the relative influence of  $\delta M_p$  in the total bending moment  $M$ . The error generated by neglecting the effect of the weight was very significant for the highest altitudes. This can simply be explained by the decrease of  $M_T$  that became zero at the force application point. Comparatively, the error due to neglecting the contribution of  $\delta M_N$  remained low in all cases although not negligible; it can be taken into account to improve the quality of the analysis. This confirms the analysis of Papesch *et al.* (1997) who already highlighted the role of the crown weight.

The  $M/M_T$  ratio can be used to determine a correction factor to  $M_T$  for each height, when the bending moment has been calculated with a conventional beam analysis. The variations of  $M/M_T$  ratio are shown in figure 7 as a function of



**Figure 6.**

Relative contribution of the three terms of equation 11 (MT,  $\delta MN$  and  $\delta MP$ ) to the total moment  $M$  at different heights (0.3, 1.3, 2.3, 3.3, and 4.3 m). The force intensity was  $F = 2.7$  kN and was applied at  $zF = 5.3$  m. a. Case of bending in the direction of the natural inclination (NI) of the tree. b. Case of bending in the opposite direction of the natural inclination (ONI) of the tree. MT is the moment due to the horizontal component of the force.  $\delta MN$  is the contribution of the vertical component of the force.  $\delta MP$  is the contribution of the weight of tree crown.



**Figure 7.**

Evolution of the  $M/M_t$  ratio as a function of the force. a. Case of bending in the direction of the natural inclination (NI) of the tree. b. Case of bending in the opposite direction to the natural inclination (ONI) of the tree. Computations were performed for 0.3, 1.3, 2.3, 3.3 and 4.3 m heights.  $M$  represents the total bending moment.  $M_t$  is the bending moment due only to the horizontal component of the force  $F$ .

the applied force  $F$ , for NI or ONI bending. As expected, in both cases  $M/M_t$  increased with the height. It was higher in case of ONI bending (figure 7b) compared to NI bending (figure 7a). For a given height, this  $M/M_t$  ratio remained almost constant as the force increased, suggesting that a simple function of height could be taken as a correction factor to  $M_t$  moment.

The above reasoning could also be achieved when the bending is due to wind drag instead of artificial pulling. In this case, for example at 1.3 m height within the trunk, the actual stresses could be increased by 20% on the tree 1 of PB235. It is not possible however to pursue this line of reasoning on the available test example because we lack data for GT1 and have no repetition.

### Required data for a full mechanical analysis

In the context of the rubber tree plantation, we enlightened the essential parameters required to undertake an estimation of the tree resistance to wind. For this, we designed a novel theoretical mechanical modelling that takes into account all the parameters of a realistic bending test of leaning standing tree such as most rubber trees in plantations (especially as they grow older that the example presented here). First, it was brought out that the computation of the bending moment applied by the wind can only be performed with the knowledge of the velocity profile of the wind, the height of the tree and its crown architecture (Petty and Swain, 1985; Peltola, 2006; Dellus *et al.*, 2004). In that way, the use of photographs, drawings, or any other representation of the crown can be a very good basis that can be coupled with a mechanical modelling to estimate the drag force and the resulting bending moment. This method is not standard in forest trees, because it is almost impossible to visualize non-destructively the front view of the crown in dense canopies; but it is usual for the assessment of wind firmness of urban trees in city parks (Dellus *et al.*, 2004).

It should be noted that the shape of the velocity profile of the wind (logarithmic, exponential...) could only be precisely determined by installing a mast equipped with several anemometers through its height. As an alternative method, a theoretical wind profile can be used; but for that we still need to calibrate them for rubber tree plantations.

Second, the impact of the drag force on the mechanical behaviour of the trunk requires the knowledge of the dimensions of the trunk and its mechanical properties. For example, the computation of the bending rigidity requires a correct description of the diameter variations along the height of the trunk. The intrinsic mechanical behaviour of the trunk can be assessed by performing bending tests on standing trees: The force applied is controlled, while the resulting longitudinal strains can be measured at different heights using strain sensors. This measurement makes possible to consider a possible variation of the local Young's modulus. To be perfectly precise, the rotation of the root anchorage and the evolution of the angle of the cable should also be taken into account during the bending tests in order to adjust the estimation of the bending moment.

In addition to the cable angle, it is necessary to measure and take into account the rotation of the root plate, as well as the elasticity and resulting shortening of the rope during the pulling test. Indeed, the displacement of the point of force application  $v(z_p)$  (which can be assimilated to the deflection in a 3-points or 4-points bending test), corrected by the effect of root rotation, is related to the shortening  $\Delta L$  according to equations 11 and 12. The knowledge of this displacement allows the estimation of the overall stiffness of the tree trunk. The application of the stem bending model with consideration of the tree crown weight showed that the impact of the weight should not be systematically neglected in the calculation of the total bending moment, especially in case of tilted trees. As the force applied during

the test increases, the relative effect of the crown weight becomes more and more important. This confirms the result of (Langbour, 1989; Moore et Gardiner, 2001), who also showed that the effect of weight was not always negligible. This point could be critical in case of strong bending tests that can be performed until the breakage of the trunk. And of course, it becomes non-negligible to estimate the bending moment on a tree submitted to high wind drag. In order to deduce a safety factor from these measurements, a growth stress assessment should be performed on the standing tree or after tree failure.

## Conclusion and prospects

We developed a mechanical theoretical model that helps to analyse the bending test experiments on standing trees. This method was applied to a small test case provided by a preliminary experiment made on 2 rubber tree clones in a plantation in Ivory Coast. This test case is insufficient to provide statistically robust results, and was only provided here to illustrate the feasibility of our method and the insights that it may provide. It confirmed that our approach is comprehensive and feasible.

On this small test case, the analysis showed that the mechanical behaviour during the bending tests of the two clones appeared to be similar at the tree scale. For the estimate of the upper-bound drag force applied by the wind, the two clones showed contrasted behaviour with PB235 that showed a 70% higher drag force than the GT1 clone. This result is due to the large difference of architecture between the two clones.

Altogether, surprisingly, the computations indicate that the two clones seemed to display a rather high safety factor against a 12-grade wind storm, which does not seem to be consistent with wind damage records. This probably comes from the fact that bending tests and crown estimations were made on different plots and that we lack replications in this preliminary test case. However, even in these conditions, a clear clonal ranking could be achieved, with the GT1 trees in our small sample displaying a twice higher safety factor for wind firmness than PB235. This ranking is consistent with wind firmness reputation from wind damage historical records in African plantations.

In order to complete the analysis, we developed a simple model, not requiring complex theoretical calculations, that considers the weight of the crown and the resulting additional bending moment that is applied to the trunk during the test. The results showed that the relative impact of the crown is not negligible and increases with the height. Its estimation requires complementary data that are often missing in the experimental tests conducted so far (even in forest trees). But we now provide a straightforward method to conduct and analyse these tests and to provide the Rubber industry with clear quantitative data on clonal ranking for wind firmness at the adult stage.

## Acknowledgments

The authors thank André Clément-Demange (CIRAD), Michel Gnagne (CNRA), Hyacinthe Legnaté (CNRA), and Dr Alexia Stokes (INRAE) for their contributions to the field mechanical experiments.

## Funding and acknowledgements

This research on wind damage affecting cultivated rubber tree clones in plantations was funded by IFC (Institut Français du Caoutchouc) and its member-companies Michelin, SIPH and Socfin. Rubber tree data used in this study were collected from a previous interorganizational thematic research project ATP 97/60 funded by CIRAD, in partnership with CNRA (Centre National de Recherches Agronomiques de Côte d'Ivoire, Bimbresso research center), Ivory Coast.

## Access to data

The data obtained during an experimental campaign in Côte d'Ivoire, in the experimental part of the Anguedou rubber plantation, are summarized in table I. The detailed measurements and analysis are available in the "Data INRAE Portail" with the following reference: Badel, Éric, 2022, "Tree bending tests", <https://doi.org/10.15454/4BQ0LW>.

## References

- Alméras T., Fournier M., 2009. Biomechanical design and long-term stability of trees: Morphological and wood traits involved in the balance between weight increase and the gravitropic reaction. *Journal of Theoretical Biology*, 256: 370-381. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2008.10.011>
- Ancelin P., Courbaud B., Fourcaud T., 2004. Development of an individual tree-based mechanical model to predict wind damage within forest stands. *Forest Ecology and Management*, 203: 101-121. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.07.067>
- Blackburn G. R. A., 1997. The growth and mechanical response of trees to wind loading. Ph. D Thesis. University of Manchester, United Kingdom, 216 p. <https://ethos.bl.uk/OrderDetails.do?uin=uk.bl.ethos.506075>
- Bossu J., Lehnebach R., Corn S., Regazzi A., Beauchêne J., Clair B., 2018. Interlocked grain and density patterns in *Bagassa guianensis*: changes with ontogeny and mechanical consequences for trees. *Trees*, 32: 1643-1655. <https://doi.org/10.1007/s00468-018-1740-x>
- Brudi E., van Wassenaeer P., 2002. Trees and statics: Non-destructive failure analysis. In: *Tree Structure and Mechanics Conference Proceedings: How Trees Stand Up and Fall Down*. Champaign, Ill, USA, International Society of Arboriculture, 17 p. [https://www.tree-consult.org/upload/mediapool/pdf/baumstatik\\_und\\_biomechanik/trees-and-statics-nondestructive-failure-analysis.pdf](https://www.tree-consult.org/upload/mediapool/pdf/baumstatik_und_biomechanik/trees-and-statics-nondestructive-failure-analysis.pdf)

- Cilas C., Costes E., Milet J., Legnaté H., Gnagne M., Clément-Demange A., 2004. Characterization of branching in two *Hevea brasiliensis* clones. *Journal of Experimental Botany*, 55: 1045-1051. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh114>
- CIRAD, 1990. L'hévéa. *Bois et Forêts des Tropiques*, 223 : 57-68. <https://revues.cirad.fr/index.php/BFT/article/view/19680>
- Clément-Demange A., Chapuset T., Legnaté H., Costes E., Doumbia A., Obouayeba S., *et al.*, 1995. Wind damage: the possibilities of an integrated research for improving the prevention of risks and the resistance of clones in the rubber tree. In: *Symposium on physiological and molecular aspects of the breeding of Hevea brasiliensis*. IRRDB symposium, 1995-11-06/1995-11-07, Penang (Malaysia). Brickendonbury, UK, IRRDB, 182-199. <http://agritrop.cirad.fr/464410>
- Clément-Demange A., Priyadarshan P. M., Tran Thy Tuy Hoa, Venkatachalam P., 2007. *Hevea* rubber breeding and genetics. *Plant Breeding Reviews*, 29: 177-283. <https://doi.org/10.1002/9780470168035.ch4>
- Combe J.-Cl., du Plessix C.-J., 1974. Étude du développement morphologique de la couronne d'*Hevea brasiliensis* (Müll. Arg. Euphorbiacées-Crotonoïdées). *Annals of Forest Science*, 31 : 207-228. <https://doi.org/10.1051/forest/19740402>
- Compagnon P., 1986. *Le caoutchouc naturel : biologie, culture, production*. Paris, France, Maisonneuve et Larose, 595 p. <https://agritrop.cirad.fr/385180/>
- Cook N., 2007. Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions. London, UK, Thomas Telford Publishing, 124 p. <https://www.boutique.afnor.org/en-gb/standard/nf-en-199114/eurocode-1-actions-on-structures-part-1-4-general-actions-wind-actions/fa104153/25897>
- Dellus V., Lesnino G., Wessoly L., 2004. Test de traction, premières applications en France. *PHM - Revue Horticole*, 461.
- Donaldson L. A., Singh A. P., 2016. Chapter 6 - Reaction Wood. In: *Secondary Xylem Biology*. Elsevier, 93-110. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802185-9.00006-1>
- Fourcaud T., Clément-Demange A., Costes E., Baillères H., Gnagne M., 1999. Étude de la casse au vent chez l'hévéa : influence du modèle architectural. *Compte rendu d'activité d'ATP Cirad*, 60 : 16.
- Fourcaud T., Clément-Demange A., Costes E., Gnagne M., 1998. Description of a simulation approach to investigate wind damage in rubber trees (*Hevea brasiliensis*). *IUFRO Conference on Wind and Other Abiotic Risks to Forests*, 1998, Helsinki, Finland.
- Fournier M., Dlouhã J., Jaouen G., Almeras T., 2013. Integrative biomechanics for tree ecology: beyond wood density and strength. *Journal of Experimental Botany*, 64: 4793-4815. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert279>
- Gardiner B., Berry P., Mouliã B., 2016. Review: Wind impacts on plant growth, mechanics and damage. *Plant Science*, 245: 94-118. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.01.006>
- Gohet E., Prévôt J.-C., Eschbach J.-M., Clément A., Jacob J.-L., 1996. *Hevea* latex production, relationship with tree growth, influence of clonal origin and Ethrel stimulation. In: *Symposium on physiological and molecular aspects of the breeding of Hevea brasiliensis*. IRRDB symposium, 1995-11-06/1995-11-07, Penang (Malaysia). Brickendonbury, UK, IRRDB, 200-216. <https://agritrop.cirad.fr/464404>
- Gril J., Jullien D., Bardet S., Yamamoto H., 2017. Tree growth stress and related problems. *Journal of Wood Science*, 63: 411-432. <https://doi.org/10.1007/s10086-017-1639-y>
- Hofmann J. P., 1984. Étude morphogénétique de la couronne de clones d'*Hevea brasiliensis* résistant et sensible à la casse au vent. *Annals of Forest Science*, 41 : 87-102. <https://doi.org/10.1051/forest:19840106>
- Langbour P., 1989. Rigidité de l'arbre sur pied, indicateur de l'élasticité longitudinale du bois : application aux peupliers. Thèse de doctorat, science du bois, Institut national polytechnique de Lorraine, France, 196 p. <https://agritrop.cirad.fr/594158/>
- Liu M., Vecchi G. A., Smith J. A., Knutson T. R., 2019. Causes of large projected increases in hurricane precipitation rates with global warming. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2: 38. <https://doi.org/10.1038/s41612-019-0095-3>
- Masson A., Monteuis O., 2017. Plantations clonales d'hévéas issues de greffes ou de boutures. *Bois et Forêts des Tropiques*, 332 : 57-68. <https://doi.org/10.19182/bft2017.332.a31333>
- Milet J., 2001. Analyse de l'architecture et comparaison de deux clones d'hévéa (*Hevea brasiliensis*) GT1-PB235. Mémoire de DESS, Université Montpellier 2, France, 108 p. <https://agritrop.cirad.fr/484430/>
- Moore J., Gardiner B., 2001. Relative windfirmness of New Zealand-grown *Pinus radiata* and Douglas-fir: a preliminary investigation. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 31: 208-223. [https://www.scionresearch.com/\\_data/assets/pdf\\_file/0004/59332/Reprint-2769.pdf](https://www.scionresearch.com/_data/assets/pdf_file/0004/59332/Reprint-2769.pdf)
- Moore J., Gardiner B., Blackburn G. R., Brickman A., Maguire D. A., 2005. An inexpensive instrument to measure the dynamic response of standing trees to wind loading. *Agricultural and Forest Meteorology*, 132: 78-83. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.07.007>
- Nicolas D., 1979. Comportement de quelques clones d'hévéa *Hevea brasiliensis* dans le Sud-est de la Côte d'Ivoire. *Revue Générale du Caoutchouc et des Plastiques*, 56 (593) : 175-181. <https://agritrop.cirad.fr/426839/>
- Obouayeba S., Soumahin E. F., Okoma K. M., N'Guessan A. E. B., Coulibaly L. F., Koffi Kouablan E., *et al.*, 2012. Temporal and structural relations within bark and trunk in *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. (Euphorbiaceae): Physiological maturity index of bark and latex vessels. *International Journal of Biosciences*, 2 (2): 56-71. <https://agritrop.cirad.fr/565253/>
- Papesch A. J. G., Moore J. R., Hawke A. E., 1997. Mechanical stability of *Pinus radiata* trees at Eyrewell Forest investigated using static tests. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 27: 188-204. [https://www.scionresearch.com/\\_data/assets/pdf\\_file/0020/59510/NZJFS2721997PAPESCH188-204.pdf](https://www.scionresearch.com/_data/assets/pdf_file/0020/59510/NZJFS2721997PAPESCH188-204.pdf)
- Peltola H. M., 2006. Mechanical stability of trees under static loads. *American Journal of Botany*, 93: 1501-1511. <https://doi.org/10.3732/ajb.93.10.1501>

Petty J., Swain C., 1985. Factors influencing stem breakage of conifers in high winds. *Forestry*, 58: 75-84. <https://doi.org/10.1093/forestry/58.1.75>

Scurfield G., 1973. Reaction Wood: Its Structure and Function: Lignification may generate the force active in restoring the trunks of leaning trees to the vertical. *Science*, 179: 647-655. <https://doi.org/10.1126/science.179.4074.647>

Sellier D., Fourcaud T., 2005. A mechanical analysis of the relationship between free oscillations of *Pinus pinaster* Ait. saplings and their aerial architecture. *Journal of Experimental Botany*, 56: 1563-1573. <https://doi.org/10.1093/jxb/eri151>

Sellier D., Fourcaud T., 2009. Crown structure and wood properties: influence on tree sway and response to high winds. *American Journal of Botany*, 96: 885-896. <https://doi.org/10.3732/ajb.0800226>

Silpi U., Thaler P., Kasemsap P., Lacoïnte A., Chantuma A., Adam B., Gohet E., *et al.*, 2006. Effect of tapping activity on the dynamics of radial growth of *Hevea brasiliensis* trees. *Tree Physiology*, 26: 1579-1587. <https://doi.org/10.1093/treephys/26.12.1579>

Vecchi G. A., Delworth T. L., Murakami H., Underwood S. D., Wittenberg A. T., Zeng F., *et al.*, 2019. Tropical cyclone sensitivities to CO<sub>2</sub> doubling: roles of atmospheric resolution, synoptic variability and background climate changes. *Climate Dynamics*, 53: 5999-6033. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04913-y>

Wang J., Chen X., Cao L., An F., Chen B., Xue L., *et al.*, 2019. Individual Rubber Tree Segmentation Based on Ground-Based LiDAR Data and Faster R-CNN of Deep Learning. *Forests*, 10: 793. <https://doi.org/10.3390/f10090793>

Watson G. A., 1989. 4. Climate and soil. In: Webster C. C., Baulkwill W. J. (eds). *Rubber*. Harlow, UK, Longman Scientific and Technical, 125-164.

Yang M., Défossez P., Danjon F., Dupont S., Fourcaud T., 2017. Which root architectural elements contribute the best to anchorage of *Pinus* species? Insights from *in silico* experiments. *Plant and Soil*, 411: 275-291. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2992-0>

### Engonga Edzang *et al.* – Author's contributions

Contributor role	Contributor names
Conceptualization	B. Mouliá, E. Badel
Formal Analysis	J. Gril, E. Badel
Funding Acquisition	B. Mouliá, E. Badel, T. Fourcaud
Investigation	A. C. Engonga Edzang, B. Niez, L. Heim, T. Fourcaud, E. Badel, J. Gril
Methodology	T. Fourcaud, E. Badel, J. Gril
Project Administration	E. Badel
Resources	T. Fourcaud
Supervision	E. Badel
Visualization	A. C. Engonga Edzang, E. Badel, J. Gril, B. Niez
Writing – Original Draft Preparation	A. C. Engonga Edzang, B. Niez, L. Heim
Writing – Review & Editing	E. Badel, J. Gril, B. Niez, B. Mouliá, T. Fourcaud

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

# 59<sup>th</sup> Annual Meeting of the Association for Tropical Biology and Conservation

## July 2<sup>nd</sup>-6<sup>th</sup>, 2023 | Coimbatore, India



### Balancing Science, Conservation, and Society

The Association for Tropical Biology and Conservation (ATBC), Indian Regional Association for Landscape Ecology (IRALE) and Kumaraguru Institutions (KI), take pleasure in extending warm welcome to all delegates and participants of the 59<sup>th</sup> Meeting of the ATBC. Located in the lap of Western Ghats, one of the oldest mountain range, known for its high biodiversity, the venue Coimbatore in Tamil Nadu, India is a multicultural vibrant city. Conservation has always been an integral part of societal value in the country. From the high mountains of the Himalaya, through the Gangetic flood plains, north-eastern hills, central Indian highlands, vast deserts, the eastern ghats, the western ghats and large coastal and marine system are symbolic of unique species assemblages. The leadership in science, conservation and societal development can be seen across diverse biogeographic zone of India. Together with the researchers and leaders of tropical biodiversity and conservation, ATBC 2023 aims to explore and illustrate the options and opportunities for balancing science, conservation and society around the world of tropical biodiversity!

### Meeting theme

Science based conservation will enable informed society towards quality of life. Because much of the biodiversity and human population densities are located in the tropics, tropical biology and conservation need to align these three pillars (science, conservation and society) towards sustainability. The world is fast changing so is the escalation of challenges to ensure secured future, specifically where the deforestation and other form of habitat loss threaten the biodiversity. Therefore, the ATBC 2023 aims to focus on the balance of science as provider of evidence-based direction, conservation as a reflection of national priorities and compassion, and society as a driver of cause and beneficiary of these intrinsic relationships. ATBC 2023 will bring together the champions and disciples alike of these three key areas, and work towards deterministic pathways for balanced approach, also keeping up with the post 2020 Global Biodiversity Framework.





RÉSUMÉ DE THÈSE /  
ACADEMIC THESIS ABSTRACT / RESUMEN DE TESIS ACADÉMICA**50 years of woody vegetation dynamics in the Senegalese Sahel (Ferlo): foundations for a functional diversity approach**

Morgane Dendoncker

## ABSTRACT

Although the resilience of woody vegetation in the Sahel has been regularly studied since the great drought of the 1970s-1980s, given the influence of this vegetation on ecosystem functioning and ecosystem services, understanding the response capacity of woody vegetation to different pressures (grazing, fire and drought) remains critical.

To understand how this vegetation copes with these pressures in the Sahelian silvo-pastoral zone of Senegal, we undertook to apply a functional diversity approach. Based on several datasets (field inventories, remote sensing data and functional traits), we built indicators at different spatial scales. First, we studied community dynamics from 1965 to 2018. Secondly, we classified species into functional groups according to their effect traits linked to primary productivity and biogeochemical cycles. Changes since 1970 in the diversity of responses of these functional groups in relation to the disturbances studied were investigated.

Remote sensing data show a decrease in the density of woody individuals until 2008, followed by stabilization (2008-2018). Historical inventories show changes in species composition, an increased ratio of bushes and a decline in the frequency of one quarter of species. Local topography strongly influences plant communities, which are dominated by a few minority species. Species and functional richness, adult and regeneration density and woody cover are all higher in lowland areas. Nevertheless, the lack of regeneration in many species is jeopardising their future.

The drought response in species whose abundance was stable from 1970 to 2015 differs from the response in declining species. The drought in the 1970s-1980s appears to have selected trait combinations that include a longer leafing period, vessels with a smaller area and shrub species. Furthermore, the diversity of responses in most of the functional groups has declined, indicating a loss of resilience of woody communities.

By cross-referencing data on species abundances with regeneration and the functional group they belong to, we determined a few key species to be protected to ensure the maintaining of ecosystem functions provided by woody vegetation in the silvo-pastoral system.

**Keywords:** drylands, woody vegetation, dynamics, regeneration, resilience, functional diversity, functional traits, Sahel.

**Cinquante ans de dynamique de la végétation ligneuse dans le Sahel sénégalais (Ferlo) : bases pour une approche de la diversité fonctionnelle**

## RÉSUMÉ

La résilience de la végétation ligneuse sahélienne est régulièrement questionnée depuis la grande sécheresse de 1970-1980, vu l'influence de cette végétation sur le fonctionnement de l'écosystème et les services écosystémiques. Il reste crucial de pouvoir appréhender la capacité de réponse de cette végétation face à différentes pressions (pâturage, feu et sécheresse). Pour comprendre comment cette végétation résiste à ces pressions dans la zone sylvo-pastorale sahélienne du Sénégal, nous avons adopté une approche de diversité fonctionnelle. À partir de plusieurs jeux de données (inventaires de terrain, télédétection, traits fonctionnels), des indicateurs ont été construits à différentes échelles spatiales. Dans un premier temps, nous avons étudié l'évolution des communautés de 1965 à 2018. Nous avons ensuite classé les espèces en groupes fonctionnels selon leurs traits d'effets liés à la productivité primaire et aux cycles biogéochimiques. L'évolution de la diversité de réponse de ces groupes face aux perturbations étudiées a été analysée depuis les années 1970.

Les données de télédétection montrent une diminution dans la densité des ligneux jusqu'en 2008, suivie d'une stabilisation (2008-2018). Les inventaires historiques révèlent un changement dans la composition spécifique, une augmentation de la proportion de buissons et une diminution de la fréquence pour un quart des espèces. La topographie locale influence fortement les communautés, qui sont dominées par une minorité d'espèces. En effet, la richesse taxonomique et fonctionnelle, la densité des adultes et régénérations ainsi que le recouvrement sont plus élevés dans les dépressions. Néanmoins, l'absence de régénérations de nombreuses espèces rend leur futur incertain. Les espèces présentant une abondance stable entre 1970 et 2015 montrent une réponse à la sécheresse différente de celles en diminution. La grande sécheresse a sélectionné des combinaisons de traits comprenant une plus longue période de fructification, des vaisseaux conducteurs de plus petite surface, et des espèces arbustives. En outre, la diversité de réponse de la majorité des groupes fonctionnels a diminué, indiquant une perte de résilience des communautés.

En croisant les données d'abondance des espèces, leur régénération et leur appartenance à un groupe fonctionnel, nous avons déterminé quelques espèces clés à protéger pour assurer le maintien des fonctions écosystémiques rendues par la végétation ligneuse dans le système sylvo-pastoral.

**Mots-clés :** zones sèches, végétation ligneuse, dynamique, résilience, régénération, diversité fonctionnelle, traits fonctionnels, Sahel.

**Cincuenta años de dinámica de la vegetación leñosa en el Sahel senegalés (Ferlo): bases para un enfoque de diversidad funcional**

## RESUMEN

La resiliencia de la vegetación leñosa saheliana se cuestiona regularmente desde la gran sequía de 1970-1980, dada la influencia de esta vegetación en el funcionamiento de los ecosistemas y en los servicios ecosistémicos. Sigue siendo crucial poder comprender la capacidad de respuesta de esta vegetación a diferentes presiones (pastoreo, fuego y sequía).

Para entender cómo esta vegetación resiste estas presiones en la zona silvopastoral saheliana del Senegal, adoptamos un enfoque de diversidad funcional. Utilizando varios conjuntos de datos (inventarios de campo, teledetección, rasgos funcionales), se construyeron indicadores a diferentes escalas espaciales. En un primer paso, estudiamos la evolución de las comunidades desde 1965 hasta 2018. A continuación, clasificamos las especies en grupos funcionales según sus rasgos de efecto relacionados con la productividad primaria y los ciclos biogeoquímicos. La evolución de la diversidad de respuestas de estos grupos frente a las perturbaciones estudiadas ha sido analizada desde los años 70.

Los datos de teledetección muestran una disminución de la densidad leñosa hasta 2008, seguida de una estabilización (2008-2018). Los inventarios históricos muestran un cambio en la composición de las especies, un aumento de la proporción de arbustos y una disminución de la frecuencia para el un cuarto de las especies. La topografía local influye mucho en las comunidades, que están dominadas por una minoría de especies. En efecto, la riqueza taxonómica y funcional, la densidad de adultos y de regeneraciones, así como la cobertura, son mayores en las depresiones. Sin embargo, la falta de regeneración de numerosas especies hace que su futuro sea incierto.

Las especies cuya abundancia se mantuvo estable entre 1970 y 2015 muestran una respuesta a la sequía diferente a la de las especies que están disminuyendo. La gran sequía seleccionó combinaciones de rasgos que incluyen un período de foliación más largo, vasos conductores de menor superficie y especies arbustivas. Además, la diversidad de respuestas de la mayoría de los grupos funcionales ha disminuido, lo que indica una pérdida de resiliencia de las comunidades.

Al cruzar los datos sobre la abundancia de las especies, su regeneración y su pertenencia a grupos funcionales, identificamos algunas especies clave que deben ser protegidas para garantizar el mantenimiento de las funciones ecosistémicas que proporciona la vegetación leñosa en el sistema silvopastoral.

**Palabras clave:** zonas áridas, vegetación leñosa, dinámica, regeneración, resiliencia, diversidad funcional, rasgos funcionales, Sahel.

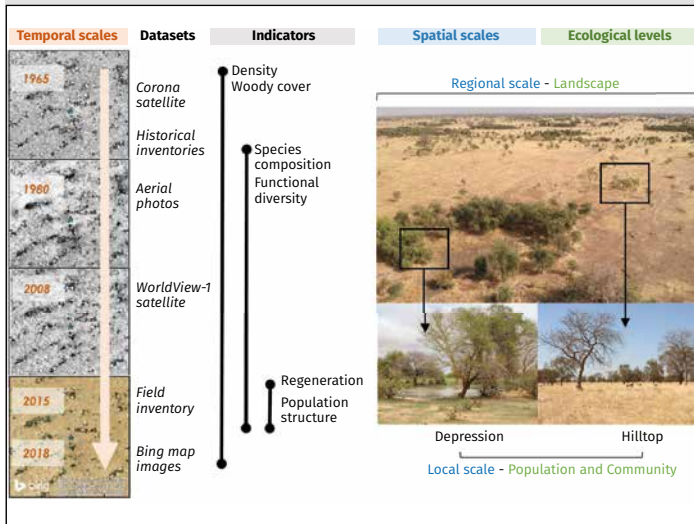


**Doi:** <https://doi.org/10.19182/bft2022.a36986>

Droit d'auteur © 2022, Bois et Forêts des Tropiques © Cirad  
Date de publication : 1<sup>er</sup> décembre 2022



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



### Synoptic diagram.

Woody vegetation was studied at different temporal scales (1965 to 2018), different spatial scales (regional vs. local) and at different levels of ecological organisation (populations, communities and landscape). The datasets are linked to a period (except for functional trait data, which are not represented). Several indicators of vegetation status were constructed at these different scales. Density and cover were studied at local and regional scales, from 1965 to 2018, species composition and functional diversity from 1970 to 2015, and population structure and regeneration in 2015.

Photo credits, from top to bottom and from left to right: S. Taugourdeau (February 2019), M. Dendoncker (April 2015) and M. Dendoncker (August 2015).

### Schéma synoptique.

La végétation ligneuse a été étudiée à différentes échelles temporelles (de 1965 à 2018), spatiales (régionale vs locale) et à différents niveaux d'organisation écologique (populations, communautés et paysage). Les jeux de données sont liés à une période (excepté pour les données de traits fonctionnels, non représentées). Plusieurs indicateurs de l'état de la végétation ont été construits à ces différentes échelles. La densité et le recouvrement ont été étudiés à l'échelle locale et régionale, de 1965 à 2018 ; la composition spécifique et la diversité fonctionnelle de 1970 à 2015 ; et la structure des populations et les régénérations en 2015.

Photographies de haut en bas, de gauche à droite : S. Taugourdeau (février 2019), M. Dendoncker (avril 2015) et M. Dendoncker (août 2015).

### Diagrama sintético.

La vegetación leñosa se ha estudiado a diferentes escalas temporales (desde 1965 hasta 2018), espaciales (regional vs. local) y a diferentes niveles de organización ecológica (poblaciones, comunidades y paisaje). Los conjuntos de datos están vinculados a un periodo de tiempo (excepto los datos de rasgos funcionales, no representados). Se han elaborado varios indicadores del estado de la vegetación a estas diferentes escalas. Se estudiaron la densidad y la cobertura a escala local y regional desde 1965 hasta 2018; la composición de especies y la diversidad funcional desde 1970 hasta 2015, y la estructura de las poblaciones y las regeneraciones en 2015.

Fotografías de arriba a abajo, de izquierda a derecha: S. Taugourdeau (febrero de 2019), M. Dendoncker (abril de 2015) y M. Dendoncker (agosto de 2015).



### Photo 1.

A specimen of *Vachellia nilotica* (L.) P. J. H. Hurter & Mabb in a hollow. In the sylvo-pastoral system studied (Ferlo, Senegal), large trees provide shade and fodder for cattle and help to regulate the water and carbon cycles.

Photo credit: C. Vincke (February 2019).

### Photo 1.

Un individu de *Vachellia nilotica* (L.) P. J. H. Hurter & Mabb dans une dépression. Dans le système sylvopastoral du Ferlo (Sénégal), les grands arbres offrent de l'ombre, du fourrage pour le bétail, et participent, entre autres, à la régulation des cycles de l'eau et du carbone.

Photographie C. Vincke (février 2019).

### Foto 1.

Un individuo de *Vachellia nilotica* (L.) P. J. H. Hurter & Mabb en una depresión. En el sistema silvopastoral del Ferlo (Senegal), los grandes árboles proporcionan sombra y forraje para el ganado y, entre otras cosas, ayudan a regular los ciclos del agua y del carbono.

Fotografía de C. Vincke (febrero de 2019).

**Graduate and academic degree:** doctorat en sciences agronomiques et ingénierie biologique

**University:** Université catholique de Louvain, Belgique

**Date of defense:** 08/10/2020.

**Composition of the jury:**

**Direction:**

Caroline Vincke (Directrice de thèse, Université catholique de Louvain *Earth and Life Institute*, Belgique)

**Members:**

Marnik Vanclooster (Président, Université catholique de Louvain, *Earth and Life Institute*, Belgique)

Charles De Cannière (Examinateur, Université libre de Bruxelles, Belgique)

Pierre Defourny (Secrétaire et Examinateur, Université catholique de Louvain, *Earth and Life Institute*, Belgique)

Alexandre Ickowicz (Examinateur, Cirad, Umr Selmet, France)

Christian Messier (Examinateur, Université du Québec à Montréal et Université du Québec en Outaouais, Canada)

**Langage used for writing:** English

**To access to the manuscript:**

<https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/object/boreal:240625>

**Funding:** FSR (UCLouvain) et FRIA (F.R.S.-FNRS, Belgique)

**Contact:**

Postal address: Croix du Sud, 2, box L7.05.24

B-1348 Louvain-la-Neuve (Belgique)

e-mail address : [morgane.dendoncker@uclouvain.be](mailto:morgane.dendoncker@uclouvain.be)

or [morgane.dendoncker@gmail.com](mailto:morgane.dendoncker@gmail.com)

### List of the published references

- Dendoncker M., Brandt M., Rasmussen K., Taugourdeau S., Fensholt R., Tucker J.C., Vincke C., 2020. 50 years of woody vegetation changes in the Ferlo (Senegal) assessed by high-resolution imagery and field surveys. *Regional Environmental Change*. <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01724-4>
- Dendoncker M., Vincke C., 2020. Low topographic positions enhance woody vegetation stability in the Ferlo (Senegalese Sahel). *Journal of Arid Environments*. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.104087>
- Dendoncker M., Taugourdeau S., Messier C., Vincke C., 2022. A functional trait-based approach to evaluate the resilience of key ecosystem functions of tropical savannas submitted to Forests, major revisions in progress.
- Dendoncker M., Vincke C., 2022. Inventory data of woody plants surveyed and measured in North Senegal (Ferlo) in 2015-2017. Dataset. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7041354>
- Brandt M., Tucker C.J., Kariryaa A., Rasmussen K., Abel C., Small J., Chave J., Rasmussen L. V., et al., 2020. An unexpectedly large count of trees in the West African Sahara and Sahel. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2824-5>
- Brandt M., Rasmussen K., Hiernaux P., Herrmann S., Tucker C.J., Tong X., et al., 2018. Reduction of tree cover in West African woodlands and promotion in semi-arid farmlands. *Nature Geoscience*. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0092-x>