



Bois & forêts

des
tropiques

2^e trimestre 2023
n° 356

SPÉCIAL
AGROFORESTERIE

Bois & forêts des tropiques

Revue éditée par le Cirad
n° 356 / 2^e trimestre 2023

Rédacteur en chef

Jean-François Trébuchon

Rédacteurs scientifiques

Kévin Candelier

Vincent Freycon

Antoine Galiana

Valéry Gond

Jean Gérard

Romain Lehnebach

Jacques Tassin

Coordination éditoriale

Jean-François Trébuchon

Comité éditorial 2023-2025

Mariam Ben Said (Maroc)

Richardson Barbosa Gomes da Silva (Brésil)

Stéphanie Carrière (France)

Pascal Danthu (France)

Chauvelin Douh (République du Congo)

Mohamed Tahr Elaieb (Tunisie)

Belkacem El Amrani (Maroc)

Gerard Nounagnon Gouwakinnou (Bénin)

Patrick Heuret (France)

Dalila Kherchouche (Algérie)

Nassima Lassouane (Algérie)

Anne Larson (Indonésie)

Lucas Jose Mazzei de Freitas (Brésil)

Bernard Mallet (France)

Jean-Yves Meyer (France)

Blandine Marie Ivette Nacoulma (Burkina Faso)

Oumeldjilali Naggar (Algérie)

Junior Ngaba (Cameroun)

Florence Bobélé Niamke (Côte d'Ivoire)

Amadé Ouédraogo (Burkina Faso)

Éric Penot (France)

Romain Pirard (Afrique du Sud)

Khelaff Rabhi (Algérie)

Josoa Randriamalala (Madagascar)

Flavio Ruffinatto (Italie)

Er-riyahi Saber (Maroc)

Boutheina Stiti (Tunisie)

Jose Antonio Sierra-Huelsz (Mexique)

Irié Casimir Zo-Bi (Côte d'Ivoire)

Graphistes

Pierre-Yves Bled

Correcteur

Jacques Bodichon

Correctrice d'épreuve en français

Christine Brognoli

Traductrices

Ilona Bossanyi, Anna Lon Quintana

Service de presse

Laurence Campas

Jean-François Trébuchon

Webmestre

Jean-François Trébuchon

Directrice de publication

Élisabeth Claverie de Saint Martin



Relecteurs ayant contribué à l'évaluation des articles en 2022/

Reviewers who have contributed

to the evaluation of articles in 2022

Tancrède Alméras, Isabelle Auger, Raphael Aussenac, Roger Bayala, Ronald Bellefontaine, Kévin Candelier, Stéphanie Carrière, Marcia Carvalho, Cyrille Chatelain, Pascal Danthu, Victor Deklerck, Magalie Delalande, Liselotte Deligne, Tom Demil, Paulo André De Oliveira, Kangbèni Dimobe, Jana Dlouha, Émilien Dubiez, Yannick Estevez, Adeline Fayolle, Vincent Freycon, Antoine Galiana, Laurent Gazull, Jaurès Gbetoho, Jean Gérard, Hassen Gherbi, Valéry Gond, Gérard Nounagnon Gouwakinnou, François Wenemi Kagambèga, Christophe Kouame, Saïd Lahssini, Patrick Langbour, Nassima Lassouane, Romain Lehnebach, Guillaume Lescuyer, Naielly Lopes Marques, William Mala, Bernard Mallet, Bruce Manley, Jean-Noël Marien, Lucas Jose Mazzei De Freitas, Florence Bobélé Niamke, Adrien Péroches, Austint Phiri, Uday Pimple, Camille Piponiot, Josoa Randriamalala, Herizo Randrianbanona, Niry Solofonianja Rasoanaivo, Jean-Marc Roda, Vivien Rossi, Patrice Savadogo, Marie-Laure Sougoti-Guissou, Jacques Tassin, Emmanuel Torquebiau, Issam Touhami, Jean-François Trébuchon, Gede Wibawa, 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: 978-2-87614-801-7 (PDF)

ISBN: 978-2-87614-800-0 (relié)

Dépôt légal : juin 2023

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 générale : É. Claverie de Saint Martin

Impression du numéro à la demande

consulter le site web 16doc : 80 €/exemplaire

Version papier abonnement annuel de 4
numéros :

France : **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>



Example of agroforestry development
in Sri Lanka countryside, rubber
intercropping plantation (single row)
with pineapple and banana in Ampara area.
Photo LOAM's officer (Penot *et al.*, 2023).



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*.

ÉDITORIAL

- Bois et Forêts des Tropiques, numéros spéciaux et nouveau comité éditorial** 3
 J.-F. TRÉBUCHON

ARTICLES SCIENTIFIQUES

- Quelles trajectoires agroforestières ? Perspectives dégagées lors du cinquième Congrès mondial d'agroforesterie : « En transition vers un monde viable »** 5
 J.-F. BISSONNETTE, G. LAROCHE, A. OLIVIER, N. GÉLINAS, M. SAYDEH, A. COGLIASTRO
- Obstacles structurels et culturels à l'adoption de l'agroforesterie à base de *tsabo* comme alternative au *tavy* autour de la Réserve de Betampona, Madagascar** 13
 D. R. RAKOTONDRATANDRA
- Techniques agroforestières à faible coût pour l'atténuation du dérèglement climatique et l'adaptation à celui-ci en Afrique subsaharienne** 29
 É. S. P. ASSSÈDÉ, S. S. H. BIAOU, P. W. CHIRWA, J. F. M. F. TONOUEWA, E. VALDÉS VELARDE
- Options agronomiques et socio-économiques pour les cultures intercalaires à base d'hévéa au Sri Lanka : une analyse prospective dans les régions de Moneragala et d'Ampara** 43
 É. PENOT, A. LE GUEN, A. CHEVREUX, C. GALLIER, H. ELLIS, J. LAVILLE, L. GUILLONNET, L. SCHIRMER, P. FENECH, S. SCHOEPFER, C. DURAND
- Séquestration du carbone et fourniture d'autres services écosystémiques des parcs agroforestiers à karité au Burkina Faso** 67
 K. DIMOBE, J. BAYALA

ARTICLE DE POSITION

- L'agroforesterie en contexte post-forestier : perspectives et controverses d'une mise à l'agenda politique en Côte d'Ivoire** 81
 H. DI ROBERTO, C. MILHORANCE, N. S. DIENG, E. SANIAL

ARTICLE D'OPINION

- Promouvoir l'agroforesterie ? Les leçons de la Côte d'Ivoire – version française** 93
 I. C. ZO-BI, B. HÉRAULT

VOS LECTURES

- Ramachandran Nair P. K., Mohan Kumar B., Nair D. Vimala, 2021. An Introduction to Agroforestry – Four Decades of Scientific Developments – Second edition.** 92
- Gassner A., Dobie P., 2022. Agroforestry: a primer – Design and management principles for people and the environment.** 105
- Torquebiau É. Le livre de l'agroforesterie : comment les arbres peuvent sauver l'agriculture.** 106

ACTES DE CONFÉRENCE

- Agroforestry systems in the world: differences and similarities – Abstract Book.** 66

CONFÉRENCES INTERNATIONALES

- 7^{ème} Conférence européenne d'écologie tropicale. 35^e réunion annuelle de la Société d'écologie tropicale. Les écosystèmes tropicaux dans une planète en évolution rapide. Lisbonne, Portugal, 12-16 février 2024.** 4





EDITORIAL

- Bois et Forêts des Tropiques, special issues and new editorial committee** 3
J.-F. TRÉBUCHON

SCIENTIFIC ARTICLES

- Trajectories for agroforestry: perspectives from the 5th World Congress on Agroforestry on "Transitioning to a Viable World"** 5
J.-F. BISSONNETTE, G. LAROCHE, A. OLIVIER, N. GÉLINAS, M. SAYDEH, A. COGLIASTRO
- Structural and cultural constraints on adopting *tsabo*-based agroforestry as an alternative to *tavy* around Betampona Reserve, Madagascar** 13
D. R. RAKOTONDRATANDRA
- Low-cost agroforestry techniques for climate change mitigation and adaptation in Sub-Saharan Africa: A review** 29
É. S. P. ASSSÈDÉ, S. S. H. BIAOU, P. W. CHIRWA, J. F. M. F. TONOUEWA, E. VALDÉS VELARDE
- Agronomic and socio-economic options for rubber intercropping in Sri Lanka: a forward analysis in the Moneragala and Ampara regions** 43
É. PENOT, A. LE GUEN, A. CHEVREUX, C. GALLIER, H. ELLIS, J. LAVILLE, L. GUILLONNET, L. SCHIRMER, P. FENECH, S. SCHOEPFER, C. DURAND
- Carbon sequestration and other ecosystem services provided by shea-tree agroforestry parks in Burkina Faso** 67
K. DIMOBE, J. BAYALA

POSITION ARTICLE

- Agroforestry following deforestation: perspectives and controversies around its inclusion in the Republic of Côte d'Ivoire's policy agenda** 81
H. DI ROBERTO, C. MILHORANCE, N. S. DIENG, E. SANIAL

OPINION ARTICLE

- Promoting agroforestry? Lessons from the Republic of Côte d'Ivoire – English version** 99
I. C. ZO-BI, B. HÉRAULT

BOOK REVIEW

- Ramachandran Nair P. K., Mohan Kumar B., Nair D. Vimala, 2021. An Introduction to Agroforestry – Four Decades of Scientific Developments – Second edition.** 92
- Gassner A., Dobie P., 2022. Agroforestry: a primer – Design and management principles for people and the environment.** 105
- Torquebiau É. Le livre de l'agroforesterie : comment les arbres peuvent sauver l'agriculture.** 106

CONFERENCE PROCEEDINGS

- Agroforestry systems in the world: differences and similarities – Abstract Book.** 66

INTERNATIONAL CONFERENCES

- 7th European Conference of Tropical Ecolog. 35th Annual Meeting of the Society for Tropical Ecology. Tropical ecosystems in a fast-changing planet. Lisbon, Portugal, 12-16 February 2024.** 4

Bois et Forêts des Tropiques, numéros spéciaux et nouveau comité éditorial

En 2022, deux grandes réunions consacrées à l'Agroforesterie se sont tenues : l'[Euraf 2022](#), du 16 au 20 mai 2022, 6^e Conférence européenne d'agroforesterie, en Italie ; et le [5^e Congrès mondial de l'agroforesterie](#), du 17 au 20 juillet 2022 au Canada. Les organisateurs du Congrès mondial de l'agroforesterie (Bissonnette *et al.*) ont joué le jeu en relayant l'appel à publier dans un numéro spécial de la revue *Bois et Forêts des Tropiques*. Quelques conférenciers présentaient des résultats de leurs travaux dans les zones méditerranéennes ou tropicales. Les auteurs ayant tenu les délais et les exigences de la revue voient leur engagement récompensé par la publication dans un numéro spécial qui s'étendra sur deux numéros. Le nombre d'articles ayant été plus grand que la capacité d'un volume, quelques articles seront publiés dans le numéro suivant.

En 2023, la réunion [IRG54](#) du Groupe international de recherche sur la protection du bois s'est tenue du 28 mai au 1^{er} juin 2023 en Australie. Certains articles présentés lors de la session spéciale sur « Les bois tropicaux : chimie de la durabilité naturelle et conférée » seront évalués et publiés dans un prochain numéro spécial consacré à la durabilité des bois. La soumission des manuscrits approche de l'échéance et les auteurs peuvent toujours proposer leurs travaux.

Pendant ce temps, la revue *Bois et Forêts des Tropiques* a renouvelé en grande partie le [comité éditorial](#) en accueillant de nouvelles personnes sélectionnées pour accompagner la revue et y siéger en tant que membre. Elles représentent un échantillon de la diversité des recherches forestières appliquées qui sont publiées dans la revue. Nous les remercions de l'attention que chacune d'elles porte à la mission de la revue. Comme l'expose leur mission, nous les encourageons de nouveau à poursuivre l'amélioration des articles soumis et publiés, la proposition de manuscrits provenant de leur entourage de doctorants et de chercheurs confirmés, et la suggestion de relecteurs internationaux potentiels. Le comité éditorial est constitué pour une durée de trois années.

Références

Bissonnette J.-F., Laroche G., Olivier A., Gélinas N., Saydeh M., Cogliastro A., 2023. Quelles trajectoires agroforestières ? Perspectives dégagées lors du cinquième Congrès mondial d'agroforesterie : « En transition vers un monde viable ». *Bois et Forêts des Tropiques*, 356 : 5-12. <https://doi.org/10.19182/bft2023.356.a37034>

Bois et Forêts des Tropiques, special issues and new editorial committee

Two major Agroforestry events were held in 2022: [Euraf 2022](#) – the 6th European Agroforestry Conference, Italy, from 16 to 20 May 2022; and the [5th World Agroforestry Congress](#), Canada, from 17 to 20 July 2022. The World Agroforestry Congress organisers (Bissonnette *et al.*) relayed the call for papers in a special issue of the *Bois et Forêts des Tropiques* journal. Several speakers presented the results of their work in Mediterranean or tropical areas. The authors who met the journal's deadlines and requirements were rewarded for their commitment by being published in a special issue that will run for two issues. As the number of articles was greater than the capacity of one volume, some articles will be published in the following issue.

In 2023, the [IRG54](#) meeting of the International Wood Preservation Research Group was held from 28 May to 1 June 2023 in Australia. Some of the papers presented during a special session on "Tropical woods: the chemistry of natural and imparted durability" will be evaluated and published for a forthcoming special issue dedicated to wood durability. The deadline for submitting manuscripts is approaching, and authors can still submit their work.

Meanwhile, the *Bois et Forêts des Tropiques* journal has renewed most of its [editorial board](#), welcoming new members who were selected to join the journal. They represent a sample of the diversity of applied forestry research published in the journal. We thank each of them for their attention to the journal mission. As stated in their mission statement, we again encourage them to keep improving the submitted and published articles, proposing manuscripts from their circle of PhD students and senior researchers, and suggesting potential international reviewers. The editorial committee is established for a period of three years.

Jean-François Trébuchon
Rédacteur en chef et coordinateur éditorial



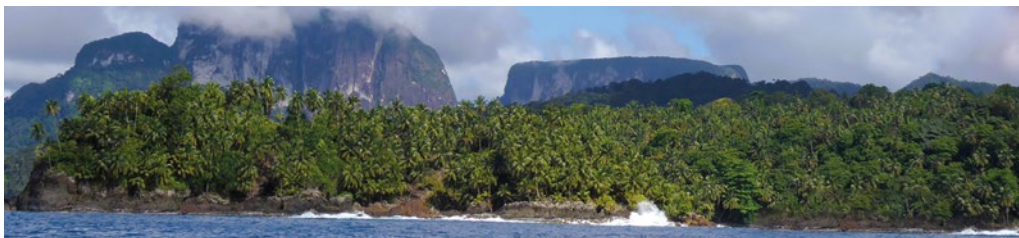
Au Nicaragua, ces jeunes caféiers hybrides à haut rendement et haute qualité aromatique s'intègrent dans un système agroforestier d'arbres à bois d'œuvre.

In Nicaragua, these young hybrid coffee trees with high yields and high aromatic quality are integrated into an agroforestry system of timber trees.

Photo É. Penot.

7th European Conference of Tropical Ecology

35th Annual Meeting of the Society for Tropical Ecology
Tropical ecosystems in a fast-changing planet
Lisbon, Portugal, 12-16 February 2024



The “7th European Conference of Tropical Ecology”, which is also the “35th Annual Meeting of the Society for Tropical Ecology” (Gesellschaft für Tropenökologie, gtö), in 2024 will be hosted by the University of Lisbon, from 12th to 16th of February 2024.

The overarching topic will be “**Tropical ecosystems in a fast-changing planet**”. It will provide an interdisciplinary platform for discussing major advances, challenges, and future opportunities in tropical ecology.

Chairs : Jorge Palmeirim, University of Lisbon, Portugal

<https://ce3c.ciencias.ulisboa.pt/member/jorge-palmeirim>

Site web : <https://www.soctropecol-conference.eu/>

Quelles trajectoires agroforestières ? Perspectives dégagées lors du cinquième Congrès mondial d'agroforesterie : « En transition vers un monde viable »

Jean-François BISSONNETTE¹
Geneviève LAROCHE²
Alain OLIVIER³
Nancy GÉLINAS¹
Marie SAYDEH¹
Alain COGLIASTRO⁴

¹ Université Laval
Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique
Département de géographie
Pavillon Abitibi-Price
2405 Rue de la Terrasse, Québec, QC G1V 0A6
Québec, Canada

² International Center for Research on Agroforestry (ICRAF)
C/O NIRDA Research Center, PO Box 227
Huye District, Southern Province
Rwanda

³ Université Laval
Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation
Département de phytologie
Chaire en développement international
Groupe interdisciplinaire de recherche en agroforesterie
(GIRAF)
Pavillon Paul-Comtois, 2425 Rue de l'Agriculture,
Québec, QC G1V 0A6
Québec, Canada

⁴ Institut de recherche en biologie végétale
Faculté des arts et des sciences
Département de sciences biologiques
4101 R. Sherbrooke E, Montréal, QC H1X 2B2
Canada

Auteur correspondant /

Corresponding author:

Jean-François BISSONNETTE –
jean-francois.bissonnette@ggr.ulaval.ca



Photos 1.

Plantations d'arbres au Nicaragua (San Juan de Limay) dans le cadre d'un projet de compensation des émissions de carbone par l'organisme Taking Roots.
Tree planting in Nicaragua (San Juan de Limay) as part of a carbon offset project by Taking Roots.
Photos J.-F. Bissonnette (2015).

Doi : 10.19182/bft2023.356.a37034 – Droit d'auteur © 2023, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 31 octobre 2022 ; date d'acceptation : 21 novembre 2022 ; date de publication : 1^{er} juin 2023.



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

Citer l'article / To cite the article

Bissonnette J.-F., Laroche G., Olivier A., Gélinas N., Saydeh M., Cogliastro A., 2023. Quelles trajectoires agroforestières ? Perspectives dégagées lors du cinquième Congrès mondial d'agroforesterie : « En transition vers un monde viable ». Bois et Forêts des Tropiques, 356 : 5-12. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2023.356.a37034>

RÉSUMÉ

Quelles trajectoires agroforestières ? Perspectives dégagées lors du cinquième Congrès mondial d'agroforesterie : « En transition vers un monde viable »

L'article propose une synthèse et une lecture critique de certaines des grandes thématiques abordées lors du cinquième Congrès mondial d'agroforesterie qui s'est déroulé du 17 au 20 juillet 2022 à Québec, au Canada, sous l'intitulé « En transition vers un monde viable ». Le congrès a mis en évidence le rôle-clé des pratiques agroforestières pour faire face à certains défis environnementaux et socio-économiques les plus criants, dont l'adaptation au changement climatique, le maintien de la biodiversité et la diversification économique en milieu rural. Si la pertinence de diffuser les pratiques agroforestières à l'échelle mondiale fait consensus, plusieurs tensions émergent, notamment en raison du contraste entre les systèmes agroforestiers en contexte d'agriculture spécialisée et les systèmes paysans, ainsi que la dualité entre la restauration écologique pour générer des crédits carbone et celle qui vise en priorité à répondre aux besoins des collectivités, dont la conception et la mise en œuvre ne sont pas dépendantes de la vente de crédits carbone. Le congrès a permis de mettre en relief trois perspectives différentes. La première perspective conçoit l'agroforesterie sur un mode plutôt productiviste et dans des aspects plutôt techniques, où on accepte l'utilisation d'un nombre restreint d'espèces exotiques afin d'atteindre des objectifs de production spécifiques. Une deuxième perspective autorise la conversion d'écosystèmes diversifiés en plantations d'arbres commerciaux exotiques, parfois monospécifiques, sans considération pour les impacts socio-économiques et culturels de ces aménagements. Une troisième perspective invite quant à elle à revisiter les systèmes agroforestiers paysans, afin de maintenir ou de recréer des agro-écosystèmes agroforestiers diversifiés et multifonctionnels. Une telle perspective associe étroitement l'agroforesterie à l'agroécologie, qui vise la mise en place d'agro-écosystèmes et de systèmes alimentaires diversifiés basés sur des connaissances locales. Dans ce contexte, un des principaux défis de l'agroforesterie pourrait bien être de proposer, de concert avec l'agroécologie, une nouvelle trajectoire de diversification des agro-écosystèmes afin de réussir la transition vers un monde viable.

Mots-clés : Congrès mondial d'agroforesterie, modèles de production, multifonctionnalité, paysans, restauration écologique, savoirs écologiques locaux.

ABSTRACT

Trajectories for agroforestry: perspectives from the 5th World Congress on Agroforestry on “Transitioning to a Viable World”

This article offers a summary and a critical appreciation of some of the major themes addressed at the Fifth World Congress on Agroforestry, held from 17 to 20 July 2022 in Quebec City, Canada, under the title “Transitioning to a Viable World”. The Congress highlighted the key role of agroforestry practices in meeting some of the most pressing environmental and socio-economic challenges, including adaptation to climate change, maintaining biodiversity, and diversifying economies in rural areas. While there is a consensus on the relevance of disseminating agroforestry practices worldwide, various tensions are emerging, notably between agroforestry systems in contexts of specialised agriculture on the one hand and peasant systems on the other, and between ecological restoration for the purpose of generating carbon credits and restoration projects aiming primarily to meet the needs of communities, whose design and implementation are not dependent on sales of carbon credits. The conference highlighted three different perspectives. The first considers agroforestry from a primarily productivist and technical angle, where the use of a limited number of exotic species is accepted in order to achieve specific production objectives. The second authorises the conversion of diversified ecosystems into plantations, which can be monospecific, of exotic commercial trees, without considering the socio-economic and cultural impacts of such projects. The third perspective calls for a reconsideration of peasant agroforestry systems in order to maintain or recreate diversified and multifunctional agro-ecosystems based on agroforestry. In this perspective, agroforestry is closely linked to agro-ecology, which aims to establish diversified agro-ecosystems and food systems based on local knowledge. One of the main challenges for agroforestry in this case would probably be to put forward, in association with agro-ecology, a new trajectory for the diversification of agro-ecosystems in order to bring about a successful transition to a viable world.

Keywords: World Congress on Agroforestry, production models, multifunctional, peasant farmers, ecological restoration, local ecological knowledge.

RESUMEN

Trayectorias agroforestales. Perspectivas del V Congreso Mundial de Agroforestería: «En transición hacia un mundo viable»

Este artículo ofrece un resumen y una lectura crítica de algunos de los principales temas tratados en el V Congreso Mundial de Agroforestería, celebrado del 17 al 20 de julio de 2022 en la ciudad canadiense de Quebec bajo el título «En transición hacia un mundo sostenible». El congreso destacó el papel clave de las prácticas agroforestales para hacer frente a algunos de los retos medioambientales y socioeconómicos más acuciantes, como la adaptación al cambio climático, el mantenimiento de la biodiversidad y la diversificación económica de las zonas rurales. Aunque existe un consenso sobre la pertinencia de difundir las prácticas agroforestales a escala mundial, están surgiendo una serie de tensiones, en particular debido al contraste entre los sistemas agroforestales en un contexto de agricultura especializada y los sistemas campesinos, así como la dualidad entre la restauración ecológica para generar créditos de carbono y la destinada principalmente a satisfacer las necesidades de las comunidades, cuyo diseño y aplicación no dependen de la venta de créditos de carbono. La conferencia puso de relieve tres perspectivas diferentes. La primera perspectiva ve la agroforestería de un modo más bien productivista y desde aspectos más bien técnicos, en los que se acepta el uso de un número limitado de especies exóticas para alcanzar objetivos de producción específicos. Una segunda perspectiva autoriza la conversión de ecosistemas diversificados en plantaciones de árboles comerciales exóticos, a veces monoespecíficos, sin tener en cuenta las repercusiones socioeconómicas y culturales de estas modificaciones. Una tercera perspectiva nos invita a revisar los sistemas agroforestales campesinos, con el fin de mantener o recrear agroecosistemas agroforestales diversificados y multifuncionales. Esta perspectiva vincula estrechamente la agrosilvicultura con la agroecología, cuyo objetivo es establecer agroecosistemas y sistemas alimentarios diversificados basados en los conocimientos locales. En este contexto, uno de los principales retos de la agrosilvicultura podría ser proponer, junto con la agroecología, una nueva trayectoria para la diversificación de los agroecosistemas con el fin de lograr la transición hacia un mundo sostenible.

Palabras clave: Congreso Mundial Agroforestal, modelos de producción, multifuncionalidad, agricultores, restauración ecológica, conocimientos ecológicos locales.

Introduction

Du 17 au 20 juillet 2022 à Québec, au Canada, ainsi qu'en mode virtuel, l'Université Laval organisait le cinquième Congrès mondial d'agroforesterie sous l'intitulé « En transition vers un monde viable ». Ce congrès a rassemblé près de 800 personnes issues des sphères de la recherche et de l'intervention agroforestière en provenance de tous les continents. Les cinq séances plénières, les 15 séances parallèles, les divers ateliers et les événements parallèles ont permis de faire le point sur l'état de l'agroforesterie dans le monde et la contribution qu'elle peut apporter à la transition vers un monde viable.

La programmation a offert aux congressistes l'occasion de penser l'agroforesterie comme un ensemble de pratiques qui seraient à même d'appuyer la transition écologique, tout en les invitant à s'interroger sur le rôle qu'elle peut jouer afin de favoriser la justice sociale et environnementale. L'événement a permis de souligner à quel point certaines pratiques agroforestières paraissent indissociables des défis auxquels sont confrontées les communautés paysannes et autochtones dans le monde, notamment les enjeux de sécurité alimentaire, les inégalités socio-économiques et la reconnaissance des droits fonciers (Ollinaho et Kröger, 2021). Le congrès a aussi mis en évidence l'importance renouvelée des pratiques agroforestières comme stratégie d'adaptation au changement climatique, tout comme leur immense potentiel de séquestration du carbone et leur contribution au maintien de la biodiversité (Garrity, 2012 ; Nair, 2007 ; Santos *et al.*, 2022 ; Udawatta *et al.*, 2019). La communauté internationale est d'ailleurs plus que jamais consciente de l'importance des pratiques agroforestières dans cette perspective, comme en témoigne le récent appel de la FAO pour évaluer les besoins de renforcement des capacités agroforestières mondiales (FAO, 2022). Si les ténors du domaine arrivent à tracer les contours d'un véritable projet agroforestier mondial, sa mise en œuvre n'est toutefois pas sans soulever nombre de tensions, dont certaines ont particulièrement retenu l'attention lors du congrès. Ainsi en est-il de la dualité entre les systèmes agroforestiers en contexte d'agriculture spécialisée et les systèmes paysans, ainsi que la dualité entre la restauration écologique pour générer des crédits carbone et celle qui vise en priorité à répondre aux besoins des collectivités.

Diffuser ou préserver l'agroforesterie ?

Si l'agroforesterie figure désormais au cœur des stratégies climatiques et environnementales internationales, il s'avère difficile de parler d'un seul et même projet agroforestier. On observe une dualité entre les territoires où il semble nécessaire d'introduire ou de réintroduire l'agroforesterie et ceux où il faut préserver et renforcer les pratiques agroforestières en place. Selon les systèmes de production, les enjeux varient considérablement.

L'adoption à grande échelle de systèmes de production agricoles spécialisés et intensifs a mené à une stricte séparation entre les milieux forestier et agricole, détruisant ou reléguant à la marge les pratiques paysannes ou autochtones antérieures, souvent fondées sur des savoirs écologiques locaux complexes. Ces modèles de production agricole intensifs en capital, essentiellement basés sur les monocultures et l'utilisation d'intrants de synthèse, sont largement dominants, couvrant 80 % des 1,5 milliard d'hectares de terres arables (Altieri et Nicholls, 2020: 882, cités par Ollinaho et Kröger, 2021). Ces systèmes sont consacrés à quelques cultures comme le maïs, le soja, le palmier à huile et le coton, généralement produites à grande échelle avec une forte empreinte écologique (Bissonnette et De Koninck, 2017). Cette simplification écologique s'observe même dans des territoires récemment intégrés à l'économie mondialisée des denrées agricoles (Elbakidze *et al.*, 2021 ; Maeda *et al.*, 2021). Or, l'expansion des monocultures est la cause première du déclin de la biodiversité et constitue une menace pour la pérennité de nombreux écosystèmes (IPBES *et al.*, 2018 ; Kehoe *et al.*, 2017). Dans ces milieux, la proposition agroforestière consiste généralement en l'introduction, dans les parcelles cultivées, de rangées d'arbres peu diversifiés, dont certaines espèces à haut rendement. Elle se présente, à titre d'exemple, sous la forme de haies brise-vent visant principalement la réduction de l'érosion éolienne ou de systèmes agroforestiers intercalaires comportant des rangées d'arbres suffisamment espacées les unes des autres pour permettre le passage de la machinerie agricole. On tente ainsi de maintenir en place les grandes cultures intensives en leur assurant un accès optimal à la lumière sans trop modifier l'équipement agricole ni l'itinéraire technique. Le déploiement des systèmes agroforestiers dans ces contextes est généralement intensif en capital et en connaissances techniques et scientifiques, y compris dans la sélection génétique ou l'hybridation des arbres plantés (Dumont *et al.*, 2019). Dans cette perspective, les systèmes agroforestiers se présentent comme de nouveaux « paquets techniques » (Olivier de Sardan, 1995) à intégrer dans le modèle de production agro-industriel afin d'en assurer la pérennité (Kolinjivadi *et al.*, 2019), voire de lancer une nouvelle tendance de diversification écologique sans toutefois remettre en cause ce modèle (Raj *et al.*, 2019). Dans un tel contexte, les questions d'adoption des aménagements agroforestiers sont cruciales et indissociables de l'ensemble des politiques publiques qui soutiennent ce modèle de production agricole.

Au contraire, dans les systèmes paysans diversifiés tels qu'ils s'observent notamment en Afrique subsaharienne, l'enjeu est la préservation des systèmes existants, voire le renforcement de leur composante agroforestière. L'enjeu est de taille, puisque plus de 1,2 milliard de personnes tirent une part importante de leur subsistance grâce à l'agroforesterie dans les pays à faible niveau de revenus (Salimath *et al.*, 2021). Il s'agit de valoriser des pratiques souvent anciennes, mais fort dynamiques et ouvertes à l'in-

novation, conservées au sein de systèmes de production familiaux couvrant des superficies souvent inférieures à deux hectares (Michon, 2015). Parmi la grande diversité de ces systèmes paysans, notons dans les tropiques le jardin de case et dans les milieux tempérés les forêts nourricières, qui tous deux sont généralement composés d'un grand nombre d'espèces d'arbres et d'herbacées. Ces systèmes agricoles à petite échelle sont normalement beaucoup plus diversifiés que les grandes exploitations et s'avèrent plus résilients face aux aléas et aux fluctuations des marchés (Laurance *et al.*, 2014). Il est également reconnu que la production sur les petites parcelles de moins de deux hectares contribue de façon disproportionnée à l'alimentation humaine, assurant 30 à 34 % des besoins alimentaires alors qu'elles ne comptent que pour 24 % de la superficie cultivée, tout en limitant le gaspillage alimentaire au champ, qui est beaucoup moins important que dans les grandes exploitations (Ricciardi *et al.*, 2018). Cependant, historiquement, les politiques agricoles des États se sont avérées peu favorables aux petits systèmes agricoles familiaux, perçus comme peu productifs et peu spécialisés (Levasseur, 2020). Malgré l'effort de défense des droits paysans à l'échelle mondiale, portés notamment par la Via Campesina, de nombreux intérêts préconisent toujours une modernisation agricole basée sur les monocultures, s'insérant dans des chaînes d'approvisionnement mondialisées (Holt Gimenez et Shattuck, 2011). Le défi est ainsi pour les autorités publiques de favoriser la reconnaissance du rôle-clé joué par les systèmes agroforestiers paysans et de valoriser les savoirs écologiques vernaculaires qui les sous-tendent. On ne peut envisager un renforcement des pratiques agroforestières paysannes sans programmes et politiques publics visant à soutenir les paysans dans la production et la mise en marché afin de leur permettre de générer les revenus nécessaires à leur bien-être.

La dualité entre des territoires où il paraît nécessaire d'introduire ou de réintroduire l'agroforesterie et ceux où il conviendrait plutôt de préserver et renforcer ses pratiques dissimule l'enjeu du choix de nos modèles de production agricole et, par-delà, du type d'agroforesterie à valoriser. Cette question, qui était souvent sous-jacente dans les plénières du congrès, apparaît de plus en plus incontournable en agroforesterie. On pourrait la résumer brièvement ainsi : l'agroforesterie doit-elle se mouler sur le modèle agro-industriel ou doit-elle plutôt s'inscrire dans une perspective agroécologique, c'est-à-dire viser l'atteinte d'un équilibre dynamique au sein des agro-écosystèmes afin d'assurer leur soutenabilité et d'augmenter leur résilience, mais aussi chercher à construire des systèmes agricoles et alimentaires plus justes pour l'ensemble de la société ? Si la réponse à cette question implique nécessairement des trajectoires différentes dans les deux grands types de contexte que nous venons de décrire, le point d'arrivée pourrait-il être le même, soit des systèmes plus productifs et plus diversifiés ?

Par ailleurs, ne faudrait-il pas tenter de prolonger le regard au-delà de cette dualité et de reconnaître le potentiel de transformation dans chaque système de production ? En effet, si l'introduction d'arbres en rangées dans

un système de monocultures peut paraître un changement bien modeste au premier abord, elle peut néanmoins être le premier pas vers une intégration des principes de l'agroécologie à petite ou plus grande échelle (Rue, 2020). À l'inverse, la volonté de certaines autorités d'assurer la conservation à tout prix de systèmes agroforestiers pour des motifs d'ordre économique ou historique, comme c'est le cas avec certaines plantations de teck en Indonésie, n'est pas sans soulever d'autres enjeux, dont celui de la liberté et du pouvoir d'agir des paysans. Ce type d'action pourrait mener au « verrouillage » de systèmes qui se doivent pourtant d'évoluer au rythme des changements socio-écologiques qui les traversent afin de conserver leur pertinence et d'assurer leur pérennité (Peluso, 1992). Finalement, la trajectoire évolutive dans laquelle s'inscrit l'agroforesterie apparaît au moins aussi importante à prendre en considération que les modèles de production pour juger de la réelle contribution des systèmes agroforestiers à la transition vers un monde viable.

Générer des crédits carbone ou assurer le bien-être des collectivités ?

À l'échelle mondiale, on estime qu'au moins 33 % des terres arables sont dégradées, et que cette proportion pourrait atteindre 90 % d'ici 2050 si rien n'est fait pour inverser la tendance (FAO et ITPS, 2015 ; IPBES *et al.*, 2018). L'agroforesterie figure au cœur des stratégies de restauration écologique mondiale (FAO et ITPS, 2015 ; Garrity, 2012). Des niveaux de dégradation plus avancés nécessitent des investissements importants de la part d'organismes nationaux ou internationaux, qui peuvent être financés par les crédits carbone dans le contexte actuel de tentatives de réduction des émissions de GES (van Noordwijk *et al.*, 2020). Il existe plusieurs initiatives internationales à cet effet, dont le Défi de Bonn qui a pour objectif de soutenir par divers moyens la restauration des paysages forestiers de quelque 350 millions d'hectares dégradés d'ici 2030.

Le potentiel de séquestration de carbone grâce à la diffusion des pratiques agroforestières est largement reconnu (Anderson et Zerriffi, 2012). Les volumes de crédits carbone générés par la plantation d'arbres sont en augmentation et auraient connu un accroissement particulièrement marqué au cours des quatre dernières années. Jusqu'à présent, à l'échelle mondiale, les marchés volontaires de carbone auraient généré 1,4 milliard de dollars afin de compenser les émissions (Ecosystem Marketplace, 2021). De multiples organismes et institutions financières s'engagent dans cette voie. Cette importante source de financement est en mesure de soutenir de nombreux projets agroforestiers, principalement dans les pays à faible niveau de revenu. On conçoit que la restauration écologique financée par les crédits carbone puisse également fournir un vaste ensemble de co-bénéfices qui favorisent la diversification économique, dont la production de bois et de fruits. Cependant, comme



Photo 2.

Système agroforestier intercalaire expérimental composé de rangées de peupliers et de feuillus nobles séparées de 40 m pour la culture du soja dans la municipalité de Nicolet, Québec.

Experimental intercropping agroforestry system composed of rows of poplars and noble hardwoods separated by 40 m for soybean cultivation in the municipality of Nicolet, Quebec.

Photo J.-F. Bissonnette.

il s'agit de projets agroforestiers financés par des sources externes aux communautés, leur mise en œuvre est délicate, coûteuse et complexe. Ces projets doivent être conçus en partenariat avec les collectivités et de manière flexible afin de répondre aux besoins locaux (Bettles *et al.*, 2021). Les coûts de transaction, soit l'ensemble des démarches incluant les aspects contractuels de l'entente entre les propriétaires fonciers et les organismes disposant des sommes issues des marchés du carbone, sont élevés (Idol *et al.*, 2011). Ces coûts favorisent les grands projets et les grands propriétaires fonciers disposant de droits de propriété formalisés, qui bénéficient d'économies d'échelle, ce qui a pour conséquence que les plus petits projets ont moins de chances de réussite (Benjamin *et al.*, 2018). De plus, les coûts de suivi (monitoring) visant à valider la quantité de carbone bel et bien séquestré sont particulièrement élevés dans les petites parcelles hétérogènes caractéristiques de plusieurs aménagements agroforestiers. L'impératif de générer des unités de crédit carbone de valeur marchande à un coût compétitif sur les marchés peut en outre mas-

quer l'apport d'écosystèmes moins productifs en matière ligneuse, mais plus complexes sur le plan de la biodiversité (Osborne, 2015). Un tel impératif impose des exigences qui peuvent aller à l'encontre des besoins des collectivités territoriales (Anderson et Zerriffi, 2012 ; Van Hecken *et al.*, 2015).

Si l'engouement pour la finance carbone est important dans les domaines de l'agroforesterie et de la restauration écologique, des défis importants subsistent dans la conciliation des objectifs de développement communautaire et de génération de crédits carbone. Le développement communautaire repose sur des processus de mobilisation et d'appropriation des innovations par les collectivités, mais les projets de plantation d'arbres financés par les crédits carbone prennent place dans des cadres plus contraignants (Anderson et Zerriffi, 2012). Selon les acteurs impliqués et les stratégies adoptées, les espèces d'arbres plantées pour la restauration écologique peuvent varier significativement. L'objectif de séquestration de carbone peut impliquer la plantation d'une seule espèce exotique à croissance rapide. Toutefois, cela peut aller à l'encontre d'autres impératifs,

comme l'augmentation de la biodiversité, qui impliquerait de planter ou de favoriser la régénération d'espèces indigènes, ou le développement local, qui pourrait demander de privilégier une espèce d'arbre fruitier à croissance lente, par exemple (Cernansky, 2018). Ainsi, chaque projet de restauration écologique nécessitera une approche adaptée aux besoins et aux réalités culturelles et écologiques locaux, notamment à la division des genres du travail et au rôle prépondérant des femmes dans l'économie paysanne. Cela complexifie davantage le vaste projet de restauration écologique agroforestier mondial soutenu par la finance carbone.

Quelle est donc la finalité de la restauration écologique : le bien-être des collectivités ou la production de crédits carbone ? À l'heure de la finance carbone, s'attaquer à une telle question, que plusieurs conférenciers et conférencières ont traitée lors du congrès, apparaît incontournable pour le domaine de l'agroforesterie. Plusieurs affirment pouvoir concilier ces objectifs en trouvant des arbitrages entre l'efficacité marchande et le développement socio-économique, mais cela ne va pas de soi (Osborne, 2015). Si l'agroforesterie vise prioritairement la production de crédits carbone, sans porter suffisamment d'attention aux besoins des collectivités locales, que ce soit dans le choix des espèces d'arbres ou les modalités de fonctionnement des projets, ces efforts pourraient avoir une portée limitée, voire s'avérer vains. D'autre part, la question du financement de la restauration écologique demeure entière, alors que de nombreux États ne semblent pas en mesure de soutenir d'importants programmes de restauration ou de plantation d'arbres. Les collectivités paysannes dont les besoins sont les plus criants ne sont souvent pas celles que les autorités publiques sont en mesure de soutenir.

Quelles agroforesteries pour un monde viable ?

Le cinquième Congrès mondial d'agroforesterie s'est avéré un lieu d'échanges particulièrement riches et diversifiés. Un ensemble de questions fondamentales en ont émergé, dont celles que nous avons présentées dans cet article. Largement perçue comme une façon d'œuvrer au développement durable, l'agroforesterie est traversée, nous l'avons vu, par des tensions qui questionnent ses orientations et les modèles de production qu'elle permet ou non de pérenniser. À la façon de Ollinaho et Kröger (2021), le congrès a permis de mettre en relief trois perspectives différentes, mais souvent imbriquées les unes aux autres dans les modèles qui sont mis en œuvre en agroforesterie. La première perspective conçoit l'agroforesterie sur un mode plutôt productiviste et dans des aspects plutôt techniques, où on ne répugne pas à utiliser un nombre restreint d'espèces exotiques afin d'atteindre des objectifs de production spécifiques. Dans la mesure où les ménages et les collectivités sont respectés dans leurs choix d'arbres et d'aménagement, cette conception de l'agroforesterie peut avoir des retombées positives, même si elle ne s'attaque pas aux

inégalités inhérentes au système alimentaire mondialisé. Une deuxième perspective va encore plus loin en matière de ce que certains n'hésiteraient pas à qualifier d'extractivisme, en autorisant la conversion d'écosystèmes diversifiés en plantations d'arbres commerciaux exotiques, parfois monospécifiques, financées par des ressources externes aux collectivités, sans considération pour les impacts de ces aménagements. Les gains apparents en productivité de ces modèles intensifs en intrants chimiques sont cependant généralement de courte durée et ne contrebalancent pas leur empreinte écologique, sans parler de leurs conséquences dans l'augmentation des inégalités socio-économiques (Horrigan *et al.*, 2002). Une troisième perspective invite quant à elle à revisiter les systèmes agroforestiers paysans ainsi que les connaissances dont ils sont issus, afin de maintenir ou de recréer des agro-écosystèmes agroforestiers diversifiés et multifonctionnels. Il s'agit, pour l'agroforesterie, d'un certain retour aux sources puisque la discipline s'est d'abord intéressée à caractériser les systèmes agroforestiers paysans afin d'en appréhender la complexité et la diversité (King, 1987). Une telle perspective associe étroitement l'agroforesterie à l'agroécologie, qui vise la mise en place d'agro-écosystèmes et de systèmes alimentaires diversifiés basés sur des connaissances locales et conçoit leur transformation dans une optique d'augmentation de leur soutenabilité et de leur résilience. Dans ce contexte, un des principaux défis de l'agroforesterie ou, devrait-on dire, des agroforesteries pourrait bien être de proposer, de concert avec l'agroécologie, une nouvelle trajectoire de diversification des agro-écosystèmes afin de réussir la transition vers un monde viable.

L'agroforesterie devrait ainsi être à l'image de la diversité des pratiques agroécologiques et culturelles, c'est-à-dire plurielle et contextualisée. Cette constatation invite à réfléchir non seulement aux pratiques agroforestières à préserver, à valoriser et à inventer pour faciliter la transition agroécologique, mais aussi aux processus qui devront sous-tendre la production, le partage et la mobilisation des pratiques et savoirs qui leur sont liés. En outre, la création de systèmes agroforestiers porteurs de justice ne pourra faire l'économie d'une redéfinition des liens entre les mondes de la recherche, de la pratique et des autorités locales ou du conseil spécialisé, encore trop souvent teintés d'inégalités d'ordre économique, moral ou politique (Andersson et Sumberg, 2017). À ce titre, un virage semble plus que nécessaire afin de mieux équilibrer les pouvoirs entre ces trois pôles, notamment en ayant recours à des processus de co-création qui laissent plus de liberté et de pouvoir décisionnel aux paysannes et paysans et aux personnes qui les appuient quant à la nature et aux modalités de la production et du partage des savoirs (Askoy et Oz, 2020 ; Daouda et Bryant, 2016 ; Eastwood *et al.*, 2022). Or, appuyer des personnes pratiquant l'agroforesterie, détenant déjà savoirs et savoir-faire et sachant innover, exige une attitude passablement différente de celle qui consiste à leur faire une place en parlant de « participation paysanne » à la recherche. Des façons structurées et démocratiques d'interagir avec l'ensemble des parties prenantes doivent être adoptées, afin d'accéder à l'ensemble des

perspectives, particulièrement celles des femmes et des personnes autochtones (Dumont *et al.*, 2019). Le monde de la recherche est-il prêt pour ce virage ? À en croire l'engagement de la relève en recherche agroforestière pour des projets interdisciplinaires ancrés dans les réalités terrain, tels que présentés lors du congrès, il semble que ces préoccupations seront de plus en plus prises en compte.

Références

- Altieri M. A., Nicholls C. I., 2020. Agroecology and the reconstruction of a post-COVID-19 agriculture. *The Journal of Peasant Studies*, 47: 881-898. <https://doi.org/10.1080/03066150.2020.1782891>
- Andersson J. A., Sumberg J., 2017. Knowledge politics in development-oriented agronomy. In: Sumberg J. (ed.). *Agronomy for Development: The Politics of Knowledge in Agricultural Research*. New York, USA, Routledge, 1-13.
- Anderson E. K., Zerriffi H., 2012. Seeing the trees for the carbon: agroforestry for development and carbon mitigation. *Climatic Change*, 115 (3): 741-757. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0456-y>
- Askoy Z., Oz O., 2020. Protection of traditional agricultural knowledge and rethinking agricultural research from farmers' perspective: A case from Turkey. *Journal of Rural Studies*, 80: 291-301. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2020.09.017>
- Benjamin E. O., Ola O., Buchenrieder G., 2018. Does an agroforestry scheme with payment for ecosystem services (PES) economically empower women in sub-Saharan Africa? *Ecosystem Services*, 31: 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.03.004>
- Bettles J., Battisti D. S., Cook-Patton S. C., Kroeger T., Spector J. T., *et al.*, 2021. Agroforestry and non-state actors: A review. *Forest Policy and Economics*, 130: 102538. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2021.102538>
- Bissonnette J.-F., De Koninck R., 2017. Social and Environmental Implications of Plantation Agriculture in Malaysia and Indonesia. *Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science*, 1-26. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389414.013.207>
- Cernansky R., 2018. How to plant a trillion trees. *Nature*, 560 (7720): 542-545. <https://doi.org/10.1038/d41586-018-06031-x>
- Daouda O., Bryant C. R., 2016. Analysis of Power Relations among Actors and Institutions in the Process of Agricultural Adaptation to Climate Change and Variability from the Diffusion of Innovations Perspective. In: Bryant C., Sarr M., Délusca K. (eds). *Agricultural Adaptation to Climate Change*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-31392-4_3
- Dumont E. S., Bonhomme S., Pagella T. F., Sinclair F. L., 2019. Structured stakeholder engagement leads to development of more diverse and inclusive agroforestry options. *Experimental Agriculture*, 55 (S1): 252-274. <https://doi.org/10.1017/S0014479716000788>
- Eastwood C. R., Turner F. J., Romera A. J., 2022. Farmer-centred design: An affordances-based framework for identifying processes that facilitate farmers as co-designers in addressing complex agricultural challenges. *Agricultural Systems*, 195: 103314. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103314>
- Ecosystem Marketplace, Forest Carbon Partnership Facility, 2021. A Green Growth Spurt: State of Forest Carbon Finance 2021. <https://www.ecosystemmarketplace.com/publications/state-of-forest-carbon-finance-2021/>
- Elbakidze M., Surová D., Muñoz-Rojas J., Persson J. O., Dawson L., *et al.*, 2021. Perceived benefits from agroforestry landscapes across North-Eastern Europe: What matters and for whom? *Landscape and Urban Planning*, 209: 104044. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104044>
- FAO, 2022. Agroforestry. <https://www.fao.org/forestry/agroforestry/en/>
- FAO, ITPS, 2015. Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Rome, Italy, Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils.
- Garrity D., 2012. Agroforestry and the future of global land use. In: Ramachandran Nair P. K., Garrity D. (eds). *Agroforestry – The future of global land use*. Springer, 21-27.
- Handa A. K., Sirohi C., Arunachalam A., Chavan S. B., 2020. Agroforestry interventions for carbon sequestration and improving degraded lands. *Climate Change and Environmental Sustainability*, 8 (1): 3-12. <https://doi.org/10.5958/2320-642X.2019.00001.2>
- Holt Giménez E., Shattuck A., 2011. Food crises, food regimes and food movements: rumblings of reform or tides of transformation? *The Journal of Peasant Studies*, 38 (1): 109-144. <https://doi.org/10.1080/03066150.2010.538578>
- Horrigan L., Lawrence R. S., Walker P., 2002. How sustainable agriculture can address the environmental and human health harms of industrial agriculture. *Environmental Health Perspectives*, 110 (5): 445-456. <https://doi.org/10.1289/ehp.02110445>
- Idol T., Haggard J., Cox L., 2011. Ecosystem Services from Smallholder Forestry and Agroforestry in the Tropics. In: Campbell W., Lopez Ortiz S. (eds). *Integrating Agriculture, Conservation and Ecotourism: Examples from the Field. Issues in Agroecology – Present Status and Future Prospectus*, vol. 1. Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1309-3_5
- IPBES, Scholes R., Montanarella L., Brainich A., Barger N., *et al.* (eds), 2018. Summary for policymakers of the assessment report on land degradation and restoration of the Intergovernmental Science Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Germany, IPBES secretariat, 44 p.
- Kehoe L., Romero-Muñoz A., Polaina E., Estes L., Kreft H., Kuemmerle T., 2017. Biodiversity at risk under future cropland expansion and intensification. *Nature Ecology & Evolution*, 1 (8): 1129-1135. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0234-3>

King K. F. G., 1987. The History of Agroforestry. In: Stepler H. A., Nair P. K. R. (eds). *Agroforestry: A Decade of Development*. Nairobi, Kenya, ICRAF (International Council for Research in Agroforestry), 3-13.

Kolinjivadi V., Mendez A. Z., Dupras J., 2019. Putting nature to work through Payments for Ecosystem Services (PES): Tensions between autonomy, voluntary action and the political economy of agri-environmental practice. *Land Use Policy*, 81: 324-336. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.11.012>

Laurance W. F., Sayer J., Cassman K. G., 2014. Agricultural expansion and its impacts on tropical nature. *Trends in Ecology & Evolution*, 29 (2): 107-116. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2013.12.001>

Levasseur P., 2020. Développement territorial et production. *AgroParisTech*. [Cours]. <https://hal.inrae.fr/hal-02942835>

Maeda E. E., Abera T. A., Siljander M., Aragão L. E., Moura Y. M. D., et al., 2021. Large-scale commodity agriculture exacerbates the climatic impacts of Amazonian deforestation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118 (7): e2023787118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2023787118>

Michon G., 2015. *Agriculteurs à l'ombre des forêts du monde : agroforesteries vernaculaires*. Arles, France, Actes Sud, 250 p.

Nair P. R., 2007. The coming of age of agroforestry. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87 (9): 1613-1619. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2897>

Olivier de Sardan J.-P., 1995. *Anthropologie et développement. Essai en socio-anthropologie du changement social*. Paris, France, Karthala, 221 p.

Ollinaho O. I., Kröger M., 2021. Agroforestry transitions: The good, the bad and the ugly. *Journal of Rural Studies*, 82: 210-221. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.01.016>

Osborne T., 2015. Trade-offs in carbon commodification: A political ecology of common property forest governance. *Geoforum*, 67: 64-77. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2015.10.007>

Peluso N. L., 1992. *Rich forests, poor people: Resource control and resistance in Java*. Berkeley, CA, USA, University of California Press, 336 p. <https://doi.org/10.1525/california/9780520073777.001.0001>

Raj A., Jhariya M. K., Yadav D. K., Banerjee A., Meena R. S., 2019. Agroforestry: A holistic approach for agricultural sustainability. In: *Sustainable agriculture, forest and environmental management*. Jhariya, M., Banerjee, A., Meena, R., Yadav, D. (eds). Singapore, Springer, 101-131. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6830-1_4

Ricciardi V., Ramankutty N., Mehrabi Z., Jarvis L., Chookoling B., 2018. How much of the world's food do smallholders produce? *Global Food Security*, 17: 64-72. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2018.05.002>

Rounsevell M., Fischer M., Rando A. T. M., Mader A., Caplat P., et al., 2018. The IPBES regional assessment report on biodiversity and ecosystem services for Europe and Central Asia. Intergovernmental Science-Policy Platform on

Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES).

Rue M., 2020. *Élaborer le paysage pour l'habiter, le cas des agriculteurs agroforestiers*. Thèse de doctorat, Université Toulouse 2 – Jean Jaurès, France. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03176336>

Salimath S. K., Manasa C., Nanaya K. M., Hegde R., Maheswarappa V., 2021. Trees on farm lands: an underexploited source to achieve nutritional security in India. In: Shit P., Pourghasemi H. R., Adhikary P., Bhunia G., Sati V. (eds). *Forest Resources Resilience and Conflicts*. Elsevier, 299-304.

Santos M., Cajaiba R. L., Bastos R., Gonzalez D., Petrescu Bakiş A.-L., et al., 2022. Why do agroforestry systems enhance biodiversity? Evidence from habitat amount hypothesis predictions. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9: 1-11. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fevo.2021.630151>

Udawatta R., Rankoth L., Jose S., 2019. Agroforestry and Biodiversity. *Sustainability*, 11 (10): 2879. <https://doi.org/10.3390/su11102879>

Van Hecken G., Bastiaensen J., Windey C., 2015. Towards a power-sensitive and socially-informed analysis of payments for ecosystem services (PES): addressing the gaps in the current debate. *Ecological Economics*, 120: 117-125. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.10.012>

van Noordwijk M., Gitz V., Minang P. A., Dewi S., Leimona B., et al., 2020. People-centric nature-based land restoration through agroforestry: A typology. *Land*, 9 (8): 251. <https://doi.org/10.3390/land9080251>

Bissonnette et al. – Contribution des auteurs

Rôle du contributeur	Noms des auteurs
Conceptualisation	J.-F. Bissonnette
Acquisition du financement	J.-F. Bissonnette, G. Laroche, A. Olivier, N. Gélinas, A. Cogliastro
Supervision	J.-F. Bissonnette
Écriture – Préparation de l'ébauche originale	J.-F. Bissonnette, G. Laroche, A. Olivier, M. Saydeh, A. Cogliastro
Écriture – Révision et édition	J.-F. Bissonnette, G. Laroche, A. Olivier, M. Saydeh, A. Cogliastro, N. Gélinas

Bois et Forêts des Tropiques - Revue scientifique du Cirad -
© Bois et Forêts des Tropiques © Cirad



Cirad - Campus international de Baillarguet,
34398 Montpellier Cedex 5, France
Contact : bft@cirad.fr - ISSN : L-0006-579X

Structural and cultural constraints on adopting *tsabo*-based agroforestry as an alternative to *tavy* around Betampona Reserve, Madagascar



Photos 1.

Transportation of bananas and people to the nearest market place, by foot (a) or by boat (b) which can be 5 to 15 km from their homes.

Photo D. R. Rakotondratandra.

Daorotiana R. RAKOTONDRATANDRA¹

¹ University of Antananarivo
Department of History
BP 907, Antananarivo
Madagascar

Auteur correspondant /

Corresponding author:

Daorotiana R. RAKOTONDRATANDRA –
daorotiana_rakotondratandra@yahoo.com

Doi : 10.19182/bft2023.356.a36920 – Droit d’auteur © 2023, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 12 mars 2022 ;
date d’acceptation : 2 janvier 2023 ; date de publication : 1^{er} juin 2023.



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

Citer l’article / To cite the article

Rakotondratandra D. R., 2023. Structural and cultural constraints on adopting *tsabo*-based agroforestry as an alternative to *tavy* around Betampona Reserve, Madagascar. Bois et Forêts des Tropiques, 356: 13-28. Doi :
<https://doi.org/10.19182/bft2023.356.a36920>

RÉSUMÉ

Obstacles structurels et culturels à l'adoption de l'agroforesterie à base de *tsabo* comme alternative au *tavy* autour de la Réserve de Betampona, Madagascar

Madagascar est reconnu dans le monde entier pour sa biodiversité exceptionnelle. Pourtant, la culture sur brûlis (*tavy*) est à l'origine de 80 à 95 % de la déforestation dans ce pays. Malgré des décennies d'efforts pour promouvoir l'agroforesterie basée sur le *tsabo* comme alternative soutenable, la pratique du *tavy* a converti 50 % de la surface initiale de la Réserve naturelle intégrale de Betampona (environ 1 200 ha) dans l'Est de Madagascar en terres cultivées ou en forêts secondaires. À l'aide d'une approche interdisciplinaire et d'un cadre théorique intégré, cette étude tente de saisir les contraintes qui pèsent sur l'adoption et l'extension de l'agroforesterie à base de *tsabo* comme alternative au *tavy* dans les petites exploitations agricoles de la zone tampon autour de cette aire protégée. Bien que l'agroforesterie à base de *tsabo* fournisse jusqu'à 67,6 % de leur revenu monétaire provenant de l'agriculture, 20 % à 43 % des ménages échantillonnés ne souhaitent plus établir de nouvelles parcelles agroforestières à base de *tsabo* ou étendre leurs parcelles existantes ; 40,6 % et 62,7 % des ménages poursuivent leurs pratiques de monoculture et de *tavy*, respectivement. Notre étude en conclut que les facteurs qui entravent l'établissement ou l'extension du mode *tsabo* dans la zone concernée comprennent des aspects structurels et culturels. D'une part, l'aggravation de l'isolement géographique, de l'insécurité rurale et de la pauvreté, associée à la désintégration des circuits de commercialisation de leurs produits agricoles, décourage les agriculteurs d'étendre leurs parcelles cultivées en mode *tsabo*. D'autre part, le riz fait partie de l'identité malgache et régit tous les aspects de la culture villageoise, mais les projets d'extension des cultures *tsabo* n'intègrent pas le riz dans les systèmes agroforestiers qu'ils proposent aux agriculteurs. Il est recommandé aux décideurs politiques et aux programmes de développement de prendre en compte ces facteurs structurels et culturels afin de concevoir des systèmes agroforestiers qui correspondent aux besoins des producteurs.

Mots-clés : *tsabo*, adoption de l'agroforesterie, persistance du *tavy*, Betampona, Madagascar.

ABSTRACT

Structural and cultural constraints on adopting *tsabo*-based agroforestry as an alternative to *tavy* around Betampona Reserve, Madagascar

Madagascar is known worldwide for its exceptional biodiversity. However, slash-and-burn cultivation (*tavy*) accounts for 80 to 95% of deforestation in this country. Despite decades of efforts to promote *tsabo*-based agroforestry as a sustainable alternative, the *tavy* agricultural technique has converted 50% of the original surface area of the Betampona Strict Nature Reserve (about 1,200 ha) in eastern Madagascar into cropland or secondary forests. Applying an interdisciplinary approach with an integrated theoretical framework, this study attempts to capture the constraints on the adoption and extension of *tsabo*-based agroforestry as an alternative to *tavy* on smallholder farms in the buffer zone around this protected area. Although *tsabo*-based agroforestry provides up to 67.6% of their cash income from farming, 20% to 43% of the households sampled no longer wish to establish new *tsabo*-based agroforestry plots or to extend their existing ones; 40.6% and 62.7% of households have continued the practices of monoculture and *tavy*, respectively. This article concludes that the factors impeding the establishment or extension of *tsabo*-based cultivation in the study area include structural as well as cultural dimensions. On the one hand, worsening geographic isolation, rural insecurity and poverty, together with the complete breakdown of marketing channels for their agricultural products, are discouraging farmers from extending their *tsabo* plots. On the other hand, even though rice is part of the Malagasy identity and governs all aspects of village culture, projects for *tsabo* extension have failed to integrate rice within the agroforestry systems they propose to farmers. It is recommended that policymakers and development programs take these structural and cultural factors into account in order to design agroforestry systems that correspond to the producers' needs.

Keywords: *tsabo*, adoption of agroforestry, persistence of *tavy*, Betampona, Madagascar.

D. R. RAKOTONDRA

RESUMEN

Limitaciones estructurales y culturales en la adopción de la agroforestería basada en el *tsabo* como alternativa al *tavy* en los alrededores de la Reserva de Betampona, Madagascar

Madagascar es mundialmente conocido por su excepcional biodiversidad. Sin embargo, el cultivo de tala y quema (*tavy*) representa entre el 80 y el 95 % de la deforestación en este país. A pesar de décadas de esfuerzos para promover la agroforestería basada en el *tsabo* como alternativa sostenible, la técnica agrícola del *tavy* ha convertido el 50 % de la superficie original de la Reserva Natural Integral de Betampona (unas 1 200 ha), en el este de Madagascar, en tierras de cultivo o bosques secundarios. Aplicando un enfoque interdisciplinar con un marco teórico integrado, este estudio trata de captar las limitaciones para la adopción y extensión de la agroforestería basada en el *tsabo* como alternativa al *tavy* en las explotaciones de pequeños agricultores de la zona tampón en torno a esta área protegida. Aunque la agroforestería basada en el *tsabo* proporciona hasta el 67,6 % de sus ingresos en efectivo procedentes de la agricultura, entre el 20 % y el 43 % de los hogares de la muestra ya no desean establecer nuevas parcelas agroforestales basadas en el *tsabo* ni ampliar las existentes; el 40,6 % y el 62,7 % de los hogares han continuado con las prácticas de monocultivo y *tavy*, respectivamente. Este artículo concluye que los factores que impiden el establecimiento o la extensión del cultivo basado en el *tsabo* en la zona estudiada incluyen dimensiones tanto estructurales como culturales. Por un lado, el empeoramiento del aislamiento geográfico, la inseguridad rural y la pobreza, junto con la completa ruptura de los canales de comercialización de sus productos agrícolas, desaniman a los agricultores para la ampliación de sus parcelas de *tsabo*. Por otra parte, aunque el arroz forma parte de la identidad malgache y rige todos los aspectos de la cultura del pueblo, los proyectos de extensión del *tsabo* no han conseguido integrar el arroz en los sistemas agroforestales que proponen a los campesinos. Se recomienda que los responsables políticos y los programas de desarrollo tengan en cuenta estos factores estructurales y culturales para diseñar sistemas agroforestales que respondan a las necesidades de los productores.

Palabras clave: *tsabo*, adopción de la agrosilvicultura, persistencia del *tavy*, Betampona, Madagascar.

Introduction

Madagascar has exceptional natural resources with an endemicity rate among the highest in the world: > 90% for vascular plants, > 50% for birds and > 98% for amphibians, reptiles and mammals (Ganzhorn *et al.*, 2001). However, 71.5% of the Malagasy people suffer from poverty and malnutrition (IMF, 2017), which are major drivers of deforestation. Between 2010 and 2014, about 99,000 ha of natural forests were lost yearly (Vieilledent *et al.*, 2018) due mainly to slash-and-burn agriculture (*tavy* or *tevy ala*) which is responsible for 80% to 95% of the conversion of Madagascar's natural forests into cropland (Freudenberger, 2010).

Two approaches have been adopted to resolve the problem of *tavy* in Madagascar (Rakotondratandra, 2021). First, the fence and fine paradigm was locally materialized by the French colonial administration through the creation of protected areas and the banning of *tavy*. However, this repressive and exclusive policy failed to stop deforestation, leading to the adoption of an integrated approach seeking to include adjacent inhabitants in the management of state-owned forests since the 1970s. In this second approach, agroforestry was promoted as an alternative to *tavy*, through Integrated Conservation and Development Projects (ICDPs) and then through mechanisms of Reduction of Emissions due to the Degradation and Deforestation (REDD) of forests as well as the Payment for Environmental Services (PES) (carbon credits).

Empirical investigations showed that agroforestry systems provide socioeconomic as well as environmental benefits ranging from local to global scales. At plot level, trees allow a more effective water utilization; reduce soil erosion; protect crops against wind damage; and reduce insect, pest and weed pressure, which increases yields (Kabwe, 2010; Quandt, 2017; Karlsson, 2018). Though not always suitable for mechanization, agroforestry is also adapted to the peasants' manual work (Berton *et al.*, 2012). At community level, the introduction of living fences reduced conflicts related to domestic animal divagation in Uganda (Kirabo *et al.* as cited by Karlsson, 2018) whereas the integration of food and tree crops helped maintain labour force locally and decrease rural exodus in Indonesia and Madagascar (Bing, 2015). At the global level, finally, agroforestry systems may help reduce deforestation thanks to the optimal use of the existing plots while providing food and timber to the producers, serve as habitats for indigenous animal and plant species that are partially dependent on natural forests, facilitate animal species migration along agroforestry corridors that connect distant isolated habitats, and stock carbon for climate change mitigation (Schroth *et al.*, 2004).

Despite the above-mentioned advantages, agroforestry adoption remains limited whereas *tavy* continues to shape Madagascar's forest landscapes (Freudenberger, 2010; Bureau National de Coordination REDD+, 2016). There is a lack of knowledge as to the factors constraining the large-scale adoption of agroforestry technologies as an alternative to *tavy* on smallholder farms adjacent to protected areas. Effectively, previous investigations (Styger *et al.*,

1999; Messerli, 2003; Nambena, 2004; Rakotomanandrisoa, 2004; Downey, 2012; Gay des Combes, 2017) used pure agronomic approaches and focused specifically on the on-plot performance of agroforestry technologies (namely the biomass production, crop yields, and income) in order to conceive systems that can improve or completely replace *tavy*. Despite an investigation carried out in the Andapa region to attempt to explain the persistence of smallholder farmers' self-provisioning from *tavy* (Laney and Turner, 2015), there is a lack of understanding as to the factors why farmers in Madagascar still practice this anthropic farming system instead of agroforestry. To complete this gap in the literature, this article focuses on the constraints to the establishment and extension of *tsabo*-based agroforestry as an alternative to *tavy* around Betampona Strict Nature Reserve (SNR), on the east coast of Madagascar. This agroforestry system includes export and fruit trees (clove, coffee, litchi, jackfruit, breadfruit, coconut and many other trees), lianas (yam, pepper and vanilla) and herbaceous plants (banana, taro, sugar cane) mixed in different ways, in space and time, with variable density and level of stratification as observed in other regions of the country (Mariel *et al.*, 2021). In Betampona region, *tsabo* trees are traditionally associated with food crops while established away from home and also with animal husbandry if settled as home garden. In order to best understand the factors impeding the adoption or extension of *tsabo*-based agroforestry as an alternative to *tavy* around Betampona SNR, this study mobilized an integrated theoretical framework as well as an interdisciplinary and multiscale approach (figure 2). Based on this theoretical framework (Rakotondratandra, 2021), four factors influencing agricultural technology adoption often advanced in the literature will be considered, namely:

- the socioeconomic characteristics of the potential adopters,
- the characteristics of the agricultural technology or practice to be promoted,
- the ways the target agricultural technology is communicated and diffused,
- the political, economic, social and cultural context into which the target agricultural technology is to be integrated.

Materials and methods

Description of the study site

The study area is located on the East coast of Madagascar where forests are among the country's most highly threatened and impacted formations (Ganzhorn *et al.*, 2001) and where multiple extension projects – such as *Bilan Écologique à Madagascar* (BEMA) and Eco-regional Initiative (ERI) – have promoted agroforestry to reduce the impacts of *tavy* on remaining forests since 1980s. Betampona is an evergreen lowland rainforest (around 500 m above sea level) located about 40 km Nord-West of Toamasina town, between latitudes 17°52'–17°56' south and lon-

gitudes 49°11'–49°15' east. Established as the first Strict Nature Reserve of Madagascar in 1927, with a surface area of 2,228 ha in 1966, Betampona plays ecological functions vital both to the wild species living within its core zone and to the livelihoods of the surrounding populations. As one of the rare primary lowland forest fragments still existing in Madagascar, in fact, it serves a refuge for animal and plant species of which more than 40 are unique in the reserve (Birkinshaw, 2002; Ghulam, 2014; Freeman *et al.*, 2014). It is also a source of water for the Ivoloïna and Ifontsy rivers.

Despite its ecological importance, Betampona Reserve is highly vulnerable to natural and anthropic threats. On the one hand, it suffers from violent tropical cyclones which frequently destroy crops. This indirectly contributes to expanding deforestation as certain inhabitants, who rely entirely on agriculture for their living, progress their *tavy* deep inside Betampona's core zone in order to grow food crops as the neighbouring valleys are too small and hill slopes severely degraded from years of slash-and burn agriculture to provide them with sufficient food (Rakotondratandra, 2021). The Reserve is partially buffered by a 100 m wide Protection Zone (PZ) where *tavy* is not allowed but still practiced. Therefore, about 50% of its original surface area has been reduced to *tavy* fields and secondary forests (Armstrong *et al.*, 2018), which also increases the spread of invasive plant species in the core zone. According to Ghulam (2014), for instance, the Chinese goyavia (*Psidium cattleianum*), the Molucca raspberry (*Rubus molluccanus*) and the Madagascar cardamome (*Aframomum angustifolium*) already cover 9.5% (402.6 ha) of the Reserve's surface area and 44.5% (195.7 ha) of its PZ.

From a sociodemographic point of view, population settlements have long existed on Betampona's buffer zone since the late pre-colonial era, with the two surrounding

Rural Communes (RC) counting for 20,832 inhabitants in 2017 (Monographie d'Ambodiriana, 2004 and 2017; Monographie de Sahambala, 2004 and 2017). Ambodiriana RC has nine *Fokontany* (the smallest administrative area, each composed of several villages), four of which (Analamangahazo, Antananarina, Fontsimavo and Andratambe) are located at less than 10 km from the Betampona Reserve (figure 1). Sahambala RC is composed of 12 *Fokontany* only one of which (Ambodirafia) abounds the Reserve. Although their population density remains low (in 2017, 16.6 to 37.4 inhabitants per km² for Ambodiriana and Sahambala, respectively), the 5 *Fokontany* surrounding Betampona Reserve shared 19% of the population of the two RC (2017).

Data collection and analyses

To capture the complexity of the factors impeding the large-scale adoption of *tsabo*, we used an integrated theoretical framework (figure 2) in which agroforestry adoption is considered as an investment decision and strategy that producer-households take in a larger system context within which multiple factors (technical, socioeconomic, biogeographic, institutional, political and cultural) interrelate at different geographic scales (field, farm, household, regional, national and international) (Rakotondratandra, 2021). Therefore, a mixed method approach of data collection and analysis was used to best address the problem.

For the data collection, we first surveyed 212 households from the above mentioned five *Fokontany* adjacent to Betampona Reserve (figure 1) using a non-probabilistic sampling method in August 2018. Face-to-face discussions with household representatives (114 women and 98 men ranging in age between 17 to 86 years old) took place in/outdoor using paper questionnaires. The survey included

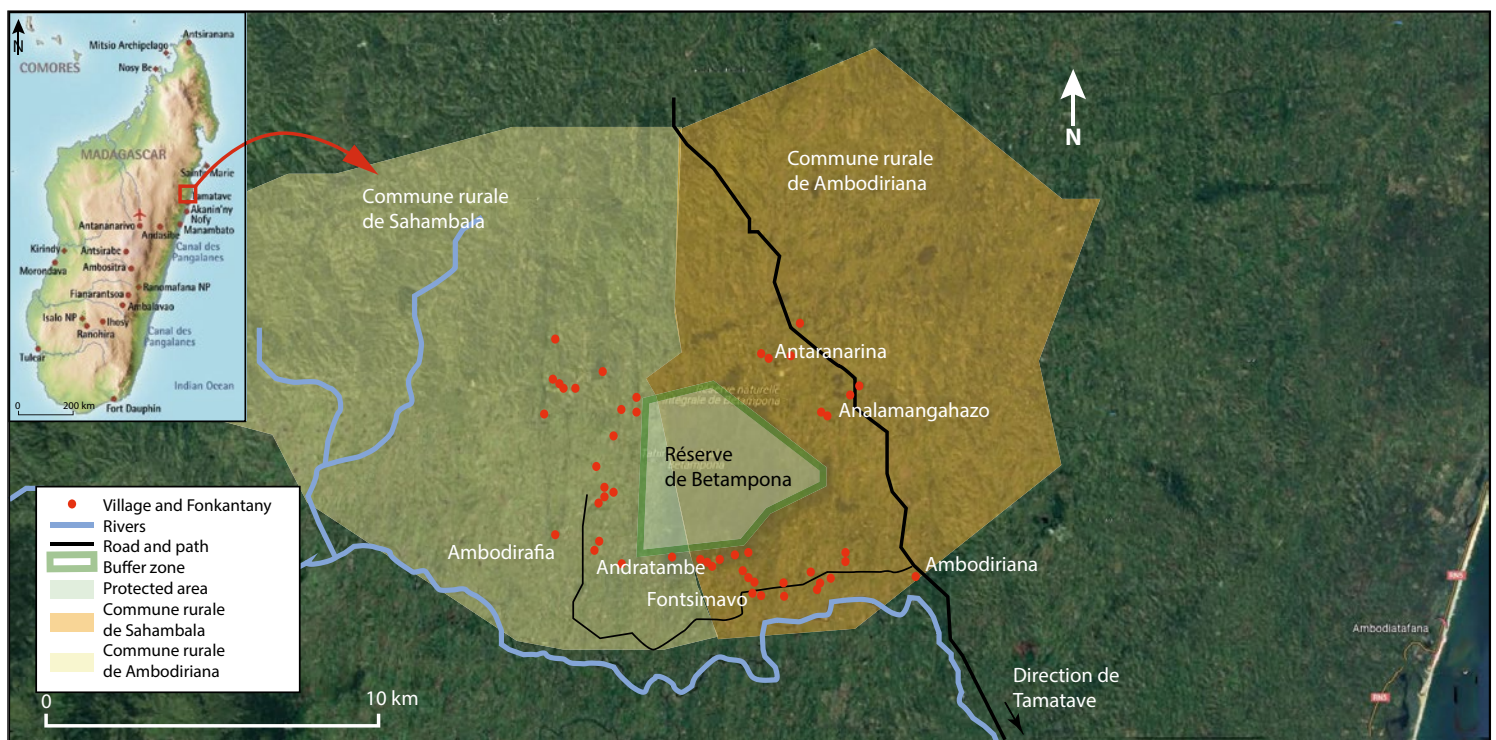


Figure 1. Location of the study site. Source: adaptation of author from Rafilipo.

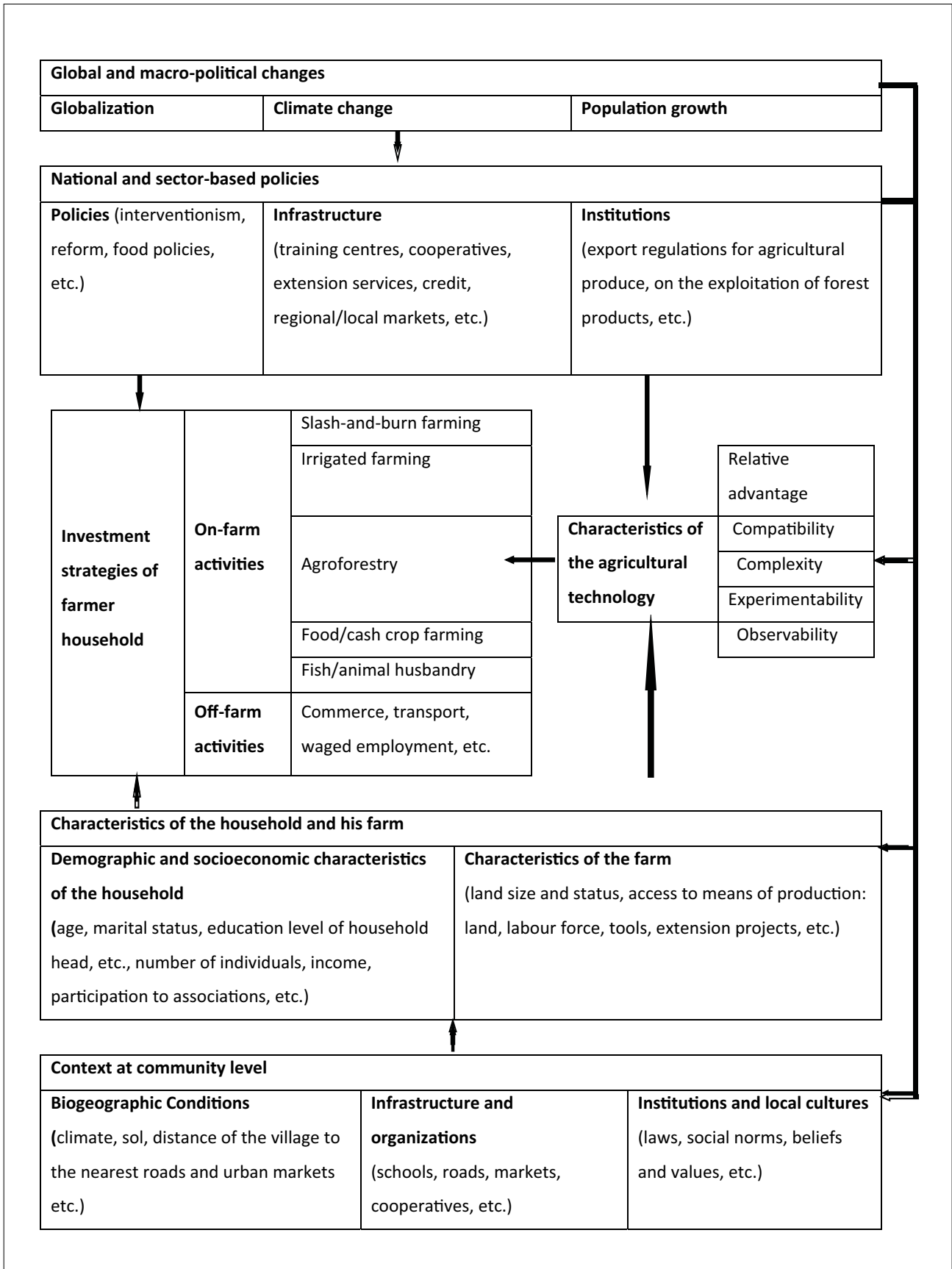


Figure 2. Integrated theoretical framework showing the interactions between extrinsic variables which determine the farmer household investment strategies and agroforestry adoption. Source: author (for more information, see Rakotondratandra, 2021).



Photo 2.

Tavy field established on the edge of the primary forest of Antananarina.
 Photo D. R. Rakotondratandra.

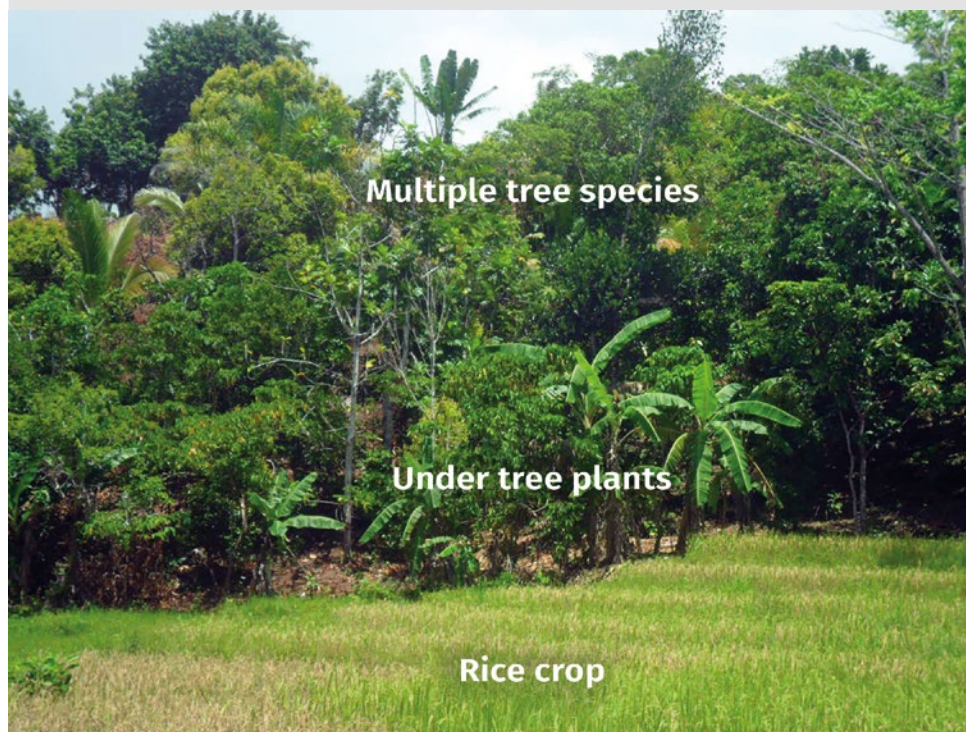


Photo 3.

Traditional *tsabo*-based agroforest.
 Photo D. R. Rakotondratandra.

questions related to both the socioeconomic characteristics of the households (marital status, education level, main activity, participation to reforestation project, etc.) and their farms (total size of lands, total size of fields allocated to food crops other than rice, integration of trees with (pluri) annual crops, income generated from farming, etc.) as well as multiple-choice questions expressing constraints in establishing and/or scaling up each target *tsabo* tree species (i.e. clove, coffee, breadfruit, jackfruit, litchi, vanilla pole, and banana). Although different fruit trees (avocado, orange, etc.) are found around the Betampona Reserve, the above-mentioned tree species are the most used as *tsabo* components. Respondents could identify among the list of factors provided the ones that are most constraining to their own case, since the reasons why a household chose to invest or not in *tsabo* varied from one crop to another (Rakotondratandra, 2021). As woody fallows were usually reserved to *tavy*, only *tsabo* trees were considered as agroforestry trees in our study. In addition, four focus groups with representatives of local nurserymen (working for extension projects promoting agroforestry), local authorities and producers were carried out in December 2018. These focus groups covered different aspects of *tavy* and *tsabo*-based agroforestry farming systems (i.e. their histories, economic values, constraints, solutions, etc.) so as to get a full grasp of their representations, evolution and dynamics in the study area.

The quantitative data obtained from the surveys were compiled and analyzed with SPSS 25 to obtain descriptive statistics and to proceed to non-parametric tests so as to compare the differences in the number of trees within and between farms and *tsabo* fields according to several independent variables related to the households and farms characteristics. As the Kolmogor-

ov-Smirnov and Shapiro-Wilk tests of normality distribution indicated a $p < 0.05$ (i.e. $p = 0.000$), signalling an abnormality in the distribution of the number of trees, a Mann-Whitney test (U) was used to test the explanatory variables with two categories while a Kruskal-Wallis test (K-W) was employed for independent variables with more than two categories. To interpret the results from these tests, we relied to the following principles: a $p < 0.05$ indicates the presence of difference whereas a $p > 0.05$ tells the absence of difference in the number of *tsabo* trees grown on the farm according to the explanatory variables being considered.

The historical-anthropological data from the focus groups were analyzed using qualitative methods to account for the political and cultural aspects of the diffusion/adoption of *tsabo* as an alternative to *tavy* in the study area. A quantitative content analysis was applied to capture the representations of *tsabo* and *tavy* by five groups of nurserymen while a thematic analysis was favoured for the remaining and longer focus group interviews (Bernard, 2006).

Results

The influence of households and farms socioeconomic characteristics on the intensity of *tsabo* tree growing

The analysis of the survey interviews revealed that households have about four members on average and are generally male-headed. While 31% of the household heads (HHs) are illiterate, 50.5% attended primary school and only 17% went to secondary school. On average, the studied farms have 3.42 ha of surface area and are distinguished by their very low resort to mechanization and their diversity in terms of both the cropping techniques used (tilling, no tilling, cover crops, monoculture, polyculture, crop-livestock integration, etc.) and their productions (woods, fruits, food/cash crops, livestock, tubers, lianas, etc.). Food crops grown in mono- or polycultures (including rice, maize, cassava, beans, etc.) cover 45% (324.87 ha) of the total surface lands of the surveyed farms, of which 48% (155.8 ha) is devoted to *tavy* and 32% (104 ha) to irrigated paddy rice production. If lack of land is often advanced among the most important factors constraining *tsabo* extension, 21% of the lands in the sample farms are allocated to *tavy* while about 30% are left fallow. Therefore, the *tsabo* fields (with the number of trees varying from 1 to 1,529) represent only 25% of the farmlands although the products from *tsabo* (such as clove, coffee, breadfruit, jackfruit, litchi, vanilla, banana and big yam) provide the households with up to 67.6% of their cash income from farming. Because 52% of the households are rice insufficient, they mainly use their food crops and *tsabo* products (excepting vanilla and clove) for their own consumption. 85.4% of the surveyed households do animal husbandry (with 1,686 heads of poultry, 116 heads of pigs and 98 heads of cows) but this activity is practiced extensively and accounts for 18% of the annual farm incomes. On average, the households earn a yearly income of 414,109 Ariary (1 dollar = 3,160 Ariary in April 2017) from farming but 50% earn < 215,000 Ariary, which is largely

insufficient for a decent life. Therefore, 46.7% and 6.6% of the household heads engage in a second or a third on/off/non-farm activity, respectively.

The extent of *tsabo* tree growing differs from one farm to the next, ranging from 1 to 1,529 trees. Table I shows that nine socioeconomic variables related to both households and farms characteristics have a significant influence on the number of trees grown on the farm.

Marital status of household heads (HHs)

The number of trees grown on the farm differs according to the marital status of the HH ($p = 0.014$). Farms belonging to single (male or female) HHs possess fewer trees (mean rank of 75) compared to those managed by HHs with partners (mean rank of 110).

Education level of household heads (HHs)

The difference in number of trees of HHs with secondary and above and without education is significant in a *post hoc* pairwise test ($p = 0.019$): mean rank of 121 compared to 89, respectively. More education may lead farmers to be more open to innovations or more actively seeking information to increase farm income. Because the differences are not statistically significant among the other categories of HHs, it can be inferred that the level of schooling of HHs does not fully influence the integration of trees in the farms of reference.

Main activity of household heads (HHs)

In a pairwise test, the main activity of the HHs showed a statistically significant difference between day labourers and small business owners in the number of trees ($p = 0.036$): mean rank of 52 and 140, respectively. Although full-time farmers tend to possess fewer trees (mean rank of 105) than small business owners, this difference is not statistically significant when a Bonferroni correction is applied ($p = 0.256$). Owing these results, it can be inferred that the main activity of the HHs does not fully explain the difference in the number of trees among the farms of reference.

Participation of household heads (HHs) to Betampona reforestation project

HHs who participate in the Betampona buffer zone reforestation project tend to possess more trees on their farms (mean rank of 120) than do non-participants (mean rank of 98); the difference is significant ($p = 0.009$).

Total size of lands on the farm (ha)

According to pairwise tests, growing trees differs in intensity according to the total size of lands on the farm ($p = 0.001$). The differences are statistically significant between farms with less than 2 ha of lands (mean rank of 70) and those with more than 5 ha (mean rank of 139), as well as between the latter and those having between 2 and 4.9 ha (mean rank of 103). This means that farms with more than 5 ha of lands tend not only to participate to Betampona reforestation project but also to grow more trees compared to those with less land.

Table I.
Tree growing intensity according to the household and farm characteristics.

Explanatory variables	Categories	Number of households	Mean rank (a)	Median number of trees	Statistical results and significance
Sex of household head	Male	97	113	96	U = 4,895.500
	Female	115	101	85	Z = -1.533 p = 0.125
Age of household head	Young (17-39 years)	91	108	86	KW = 460
	Old (40-59 years)	98	107	89	ddl = 2
	Very old (≥ 60 years)	23	98	80	p = 0.794
Marital status of household head	Without partner	21	75	66	U = 1,351.000
	With partner	191	110	90	Z = -2.453 p = 0.014
Education level of household head	Illiterate	66	89	71	KW = 7.951
	Primary school	107	112	96	ddl = 2
	Secondary school and plus	39	121	116	p = 0.019
Number of household members	1-5	153	103	86	U = 4,040.000
	≥ 6	59	114	90	Z = -1.183 p = 0.237
Number of household members who are working	1-3	190	107	87	U = 2,070.000
	≥ 4	22	106	80	Z = -0.070 p = 0.944
Main activity of household head	Farmer	187	105	86	KW = 8.525
	Waged worker	5	119	258	ddl = 3
	Small business owner	15	140	144	p = 0.036
	Daily worker	5	52	52	
Adherence of household head to rural association	No membership	174	105	86	U = 3,065.500
	Membership	38	113	122	Z = -0.702 p = 0.483
Participation of household head to Betampona reforestation project	Non-participant	129	98	80	U = 4,215.000
	Participant	83	120	116	Z = -2.612 p = 0.009
Means of transportation of products to market place	Man's back	197	106	86	U = 1,313.500
	Bicycle	15	117	102	Z = -0.716 p = 0.474
Total size of lands on the farm (ha)	< 2	15	70	37	KW = 14.803
	2 to 4.9	164	103	85	ddl = 2
	> 5	33	139	181	p = 0.001

Total size of fields allocated to food crops other than rice (ha)

The number of trees on the farms differs significantly according to the total size of fields the households allocate to food crops other than rice ($p = 0.000$). The differences are significant between households allocating land to only rice (mean rank of 43) and those growing less than 0.05 ha of food crop other than rice (mean rank of 111) as well as between the formers and households having 0.05 to

0.099 ha of this type of crop (mean rank of 117). Households without land allocated to non-rice food crops incorporate fewer trees on their farms (mean rank of 43) compared to those having 0.1 ha and more (mean rank of 94) but this difference is not significant after a Bonferroni correction is applied ($p = 0.141$). These results show that the intensity of tree farming does not fully depend on the size of fields allocated to non-rice food crops.

Explanatory variables	Categories	Number of households	Mean rank (a)	Median number of trees	Statistical results and significance
Total size of irrigated rice fields on the farm (ha)	Without	44	94	77	KW = 2.371 ddl = 2 p = 0.306
	< 1	129	109	89	
	≥ 1	39	112	102	
Total size of pluvial rice fields (tavy) on the farm (ha)	Without	80	107	83	KW = 0.026 ddl = 2 p = 0.987
	< 1	38	107	96	
	≥ 1	94	106	86	
Total size of fields allocated to food crops other than rice (are)	Without	14	43	23	KW = 17.760 ddl = 3 p = 0.000
	< 5	142	111	89	
	5 to 9.9	37	117	120	
	≥ 10	19	94	72	
Total number of banana trees and yam plants	Without	08	29	7	KW = 31.291 ddl = 2 p = 0.000
	≤ 200	191	105	86	
	> 200	13	180	363	
Integration of trees with (multi)annual crops	No	31	51	36	U = 1,074.000 Z = -5.487 p = 0.000
	Yes	181	116	102	
Total number of poultry birds (head)	Without	40	87	74	KW = 5.856 ddl = 2 p = 0.053
	1 to 29	162	111	89	
	≥ 30	10	121	127	
Total number of livestock (head)	Without	119	102	86	KW = 1.688 ddl = 2 p = 0.430
	1- 4	84	111	88	
	≥ 5	9	121	121	
Household rice self-sufficiency	Selfsufficient	102	99	99	U = 4,838.500 Z = -1.729 P = 0.084
	Non selfsufficient	110	114	75	
Income generated from farming (Ariary)	Without	23	58	39	KW = 35.567 ddl = 2 p = 0.000
	< 400,000	122	98	82	
	≥ 400,000	67	139	169	
Distance to the place where firewood is collected (km)	< 2	114	101	80	U = 4,994.000 Z = -1.329 p = 0.184
	≥ 2	98	112	102	
Distance of the Fokontany to the communal market (km)	≤ 8	166	109	89	U = 3,387.500 Z = -1.169 P = 0.242
	> 8	46	97	82	

(a): number of trees on the family farm; Z: critical value of the Mann-Whitney test; U: Mann-Whitney test; KW: Kruskal-Wallis test; ddl: degree of liberty; p : p-value
 Source: D. R. Rakotondratandra.

Total number of banana trees and yam plants

The number of trees on the farms increases with the number of banana trees and yam plants ($p = 0.000$). The differences are statistically significant between farms without banana trees and yam plants and those having ≤ 200 , between the formers and farms having > 200 of such trees and plants as well as between those possessing ≤ 200 and those having > 200 . These results indicate that tree farming differs in intensity according to the number of banana trees

and yam plants the households grow on their individual lands.

Integration of trees with (pluri)annual crops

The number of trees on the farm varies according to whether the household does or does not associate trees with (multi)annual crops ($p = 0.000$). In fact, households who practise tree-crop integration also possess more trees on their farms (mean rank of 116) compared to those who

Table II.
Factors hindering the establishment/extension of *tsabo*^a according to producers' perceptions.

List of factors ^b	Responses		Percentage of observations
	Effective	Percentage	
Problem of marketing	113	19.8%	42.6%
Problem of thievery	98	17.1%	37.0%
Lack of land	88	15.4%	33.2%
Problem of transportation	70	12.2%	26.4%
Difficulty to grow/care for crops ^c	58	10.1%	21.9%
Lack of seedlings	56	9.8%	21.1%
Other ^d	46	8.0%	17.4%
It takes years before one can get the first harvest	19	3.3%	7.2%
Fear of cyclone	17	3.0%	6.4%
Fear of bush fire	7	1.2%	2.6%
Total	572	100.0%	N= 265^e

a. Coffee, clove, banana, big yam, vanilla, litchi, breadfruit, and moringa.
b. Group of dichotomies put in table at value 1.
c. Due to lack of time, of labour force, of technical knowledge or means (including the financial one).
d. Due to old age or the fact of already possessing trees on the farmland.
e. Sample size.
Source: D. R. Rakotondratandra.

Table III.
Representations of *tsabo* by 10 local nurserymen.

List of responses	Frequency	Percentage valid	Percentage accrued
Perennial crops/association of (export) crops	7	36.8	36.8
Source of cash/lasting livelihood	7	36.8	73.7
Source of food	5	26.3	100.0
Total	19	100.0	

Source: D. R. Rakotondratandra.

do not (mean rank of 51). This is explained by the fact that trees are often used to shade and support (multi)annual crops such as yam, pepper, vanilla, and pole beans, whereas fast growing crops like bananas are established to provide shade to young trees and provide income until those trees start producing.

Income generated from farming (Ariary)

The number of trees on the farm increases with the amount of income the household generates from farming ($p = 0.000$). Effectively, the differences from the pairwise test are statistically significant between farms without income from farming and those getting < 400,000 Ariary ($p = 0.020$), between the formers and farms earning $\geq 400,000$ Ariary ($p = 0.000$) and between farms getting < 400,000 Ariary and those earning $\geq 400,000$ Ariary ($p = 0.000$).

The influence of the local context on the producers' motives to establish and/ or extend *tsabo* tree numbers and species diversity

Statistical results shown in table II reveal six factors constraining producers from establishing or extending a sample of eight target *tsabo* species, namely: access to markets (19.8%), theft (17.1%), lack of land (15.4%), problem in transporting the produce to markets (12.2%), difficulty to establish/care for crops (10.1%), and lack of plant material (seeds and seedlings) (9.8%). However, factors related to the long-term nature of return on investment (3.3%), fear of cyclones (3%), and bushfires (1.2%) do not constrain producers. These results indicate that problems related to both crop evacuation and means of production as well as the local context are at play in *tsabo* establishment/extension.

The influence of *tsabo* socioeconomic characteristics on its adoption potential

The analysis of the focus group interviews revealed that, from the colonial era to the 1970s, different State-led programmes were implemented to diffuse the monoculture of cash crop species (like clove trees, coffee trees, litchi trees, pepper, banana, and vanilla, etc.) along Ivoloia valleys. However, the local producers have always associated these with food crops (i.e. chilli, big yam, vegetables, etc.) or/and with small animal husbandry (zebu, pork, and poultry). More than 80% of the sample households do *tsabo* agroforestry because it is very important to their existence. Group discussions with ten local nurserymen working for nongovernmental projects diffusing agroforestry as an alternative to *tavy* consider *tsabo* as a lasting source of cash/livelihood in 36.8% of their answers to our questions *fameloman-tena maharitra* (table III). Effectively, *tsabo*-based agroforestry contributes a lot to the economic and sociocultural lives of the local communities: as a place where children socialize to rural life when helping their parents with farming activities and as a source of useful materials (medicinal plants, firewoods, etc.), food (breadfruit, jackfruit, yam, vegetables, etc.) and cash income (allowing the producers to accomplish and maintain community customs including *tsaboraha*: a ritual where zebu is sacrificed and pieces of beef are offered to the dead ancestors while the living descendants share the rest of the carcass).

Thanks to their decades of existence in the Betampona landscapes, therefore, *tsabo*-based agroforestry is highly favourable to the local peasants' systems of production, for they are technically easy to understand, economically profitable and culturally compatible with the villagers' values (table IV). Despite these advantages, *tsabo* agroforestry adoption is not generalized and only practised on small parcels of less than one hectare, often on marginal, degraded land no longer suitable for *tavy*. Thus, many households no longer wish to establish a new *tsabo* field (20%) or to extend their old ones (43%), preferring monoculture cassava or rice growing (41%) with almost the two-thirds of households doing so using *tavy* methods.

interest in diffusing tree-crop polyculture or small livestock husbandry. Third, the great majority of these initiatives only supported producers who were members of associations, disadvantaging those who were not.

The influence of historical and anthropological factors on farmers' willingness to abandon *tavy* for *tsabo*

The history of agricultural extension efforts in the study area shows that indigenous producers started to extend *tsabo* farming when the colonial farms collapsed in the 1940s due to the difficulty exporting products during World War II as well as the reprisals against the colonizers

Table IV.
 Characteristics of *tsabo*-based agroforestry systems which may influence their rates of adoption.

Characteristics	<i>Tsabo</i> -based agroforestry systems
Relative advantage	<ul style="list-style-type: none"> - Because few cares are necessary in <i>tsabo</i> farming, producers can do other activities: one/two yearly weeding suffice and, except for vanilla farming, no other care is required before harvest - <i>Tsabo</i> serves as a lasting source of cash
Compatibility	<ul style="list-style-type: none"> - These agroforestry systems have been diffused and practised for more than 40 years - These agroforestry systems are embodied into the local values: a source of cash that allows farmer households to perpetuate ancestral customs without having to use rice from their granaries, a place where children socialize to rural life, and an accessible source of food during hard times
Complexity	These techniques are very easy to use: farmers are used to growing cash crops from their early childhood
Experimentability	It is obvious for a farmer to try one tree on the edge of his fields or yard before growing them on a large scale
Observability	No demonstration plot is needed as interested farmers can observe fields belonging to their neighbours

Source: D. R. Rakotondratandra.

The influence of diffusion strategies on *tsabo* adoption potential

The focus group interviews indicated that two distinct initiatives with differing strategies marked the history of *tsabo* diffusion in Betampona region (table V). State-led initiatives in the 1896-1990 period sought to fully organize cash crop planting and marketing by providing farmers with all technical supports they needed: on-farm training, distribution of seedlings, rehabilitation of paths/roads, creation of marketing cooperatives, and integration to international market agreements. Nongovernmental initiatives since 2000 used quite different diffusion strategies. First, they provided beneficiaries with theoretical training and limited seeds and seedlings, without following up their planting and management nor organizing the market for the produce. Second, these projects mainly promoted systems based on annual food crops grown in rotation or association but had little

in 1947. Established as monoculture in the beginning, the four export crops (coffee, clove, banana and pepper) diffused as agroforestry orchards by State-led programmes since the 1970s are nowadays fully integrated into the farmers' systems of production. According to eyewitnesses, these crops covered more than 10 km wide along the rivers/roads before they collapsed in the 1980s, thus "hiding the sun underneath the forest-like *tsabo* trees". As State-led programmes did not provide extension and marketing services for food crops nor animal husbandry, producers relied on cash generated from *tsabo* to buy staple food. Our group interview with local nurserymen revealed that producers grew and valued cash crops more than rice in the 1970s for the latter was cheaper: clove was sold at 40-60 Ariary a kilogram, coffee at 24-40 Ariary and rice at 11 Ariary. However, our group interview with local producers revealed that people around the Betampona Reserve turned their *tsabo* fields into *tavy* mainly to produce rice when the price

Table V.
Initiatives aiming at diffusing *tsabo* in the Ivoloïna valleys and buffer zone around Betampona Reserve.

Domains of intervention		Number out of three state-led initiatives (1896- 1990) ^(a)	Number out of eight non-governmental initiatives (2000- 2018) ^(b)
Technical supports	Theoretical training	3	3
	Demonstration plots	3	2
	On-field follow-up/control	3	3
	Distribution of seedlings	3	3
	Organization of the market for the produce	3	0
Types of agricultural systems diffused	Monoculture	2	0
	Food- cash crop tree polyculture	1	3
	Rice- cash crop tree polyculture	0	1
	Food crop rotation/association	0	4
	Small husbandry	0	2
Selection criteria of beneficiaries	Member of association	0	7
	Any household interested	3	1

^(a) (1) Fonds de soutien du café et Caisse de stabilisation des prix du café de Madagascar et dépendances (1953-1960). (2) Opération banane d'exportation (1960-1980s). (3) Opération café-poivre-girofle et caisses de stabilisation des prix (1964-1980s).
^(b) (1) NGO SAF/FJKM (2000/2017...). (2) NGO SECALINE (2006). (3) Eco-Regional Initiative - ERI (2007-2009). (4) Projet de soutien au développement rural - PSDR (2007-2010). (5) Projet de restauration forestière de Betampona (2007...). (6) Formation professionnelle et d'amélioration de la productivité agricole - FORMAPROD programme (2016-2021). (7) Save Our Species - SOS-LEMURS project (2007-2020). (8) Conservation of Key Threatened Endemic and Economically Valuable Species in Madagascar - COKETES project (2017-2021).
Source: D. R. Rakotonratandra.

of export crops collapsed and cyclones destroyed the crops in the 1980s. In fact, the farmers who already suffered from cyclones damages and the end of State-led programmes (which organized the planting and marketing of export products) were forced to find what to eat from day to day, so they converted their *tsabo* fields (which were invaded by *takoaka* [*Rubus molluccanus*] because no one cared for them) into *tavy*.

It comes out from our discussions with respondents that Betampona farmers acknowledge that *tavy* is neither environment-friendly nor economically viable but they insist on the unavailability of alternatives to explain why they keep practicing it. In fact, some producers noticed the widespread of insect pests destroying the rice plants due to the repetitive practice of bushfire and *tavy* while some others indicated on the economic disadvantages of these agricultural systems because people invest a lot of money and time for preparing, seeding and weeding the field, and also for harvesting but they harvest a very poor quantity of paddy.

According to Betampona producers' conception, "a well-off farmer is the one who is producing a surplus of food, i.e. rice". However, very few farmers produce a surplus: 52% of the households we interviewed are not rice self-sufficient. Consequently, Betampona producers qualify *tsabo* as lasting crops that future generations can inherit (*volv maharitra holoain'ny taranaka*) but they firmly stick

to *tavy* rice production as it occupies a determinant place for their daily lives as well as for the *Betsimisaraka* cultural identities. More strikingly, 50% of the answers we got from the group of nurserymen identified *tavy* as a means for producing rice while one answer designed it as an "alternative to irrigated rice". In fact, Betampona producers think that "clove [so are coffee, vanilla and cola nuts] cannot be served alone as a staple food as rice can, but it needs to be sold before one can buy food". Or cash generated from *tsabo* does not suffice to provide households with all their needs: foods, hospital fees, children school fees, contribution to community events such as *tsaboraha* ceremonies, etc.

Discussion

Results from nonparametric tests (table I) reveal that *tsabo* tree growing varies in intensity according to nine variables: (1) marital status of HH, (2) level of education of HH, (3) main activity of HH, (4) participation of HH to Betampona reforestation project, (5) total size of lands on the farm, (6) total size of fields allocated to food crops other than rice, (7) total number of banana trees and yam plants, (8) integration of trees with (multi)annual crops, and (9) income generated from farming. Nevertheless, only variables (1) through (4) represent the HH's characteristics, the remaining variables relating to those of the farms. Or, if HHs without partners (variable 1) only count for 10% of the

sample, the pairwise tests showed that variables (2) and (3) do not fully explain the differences in number of trees grown on-farm, which is inconsistent with other findings (Sood, 2005). Sole variable (4) is statistically significant because participants to Betampona reforestation project (39.1% of the sample) benefited from material/technical advantages (training, seeds/seedlings/tools, etc.), which allowed them to invest more in tree growing. Therefore, the statistical tests reject the factor (1) related to the characteristics of adopters but support the influence of those of the farms on the intensity of tree growing (Sood, 2005) (i.e. variables 5 through 9).

We saw previously that *tsabo*-based agroforestry is highly compatible with the local way of life, hence factor (2) related to *tsabo* characteristics cannot explain why producers are not scaling them up as an alternative to *tavy*. This reinforces the role of the following exogenous factors as some *tsabo* crops (vanila, clove, peper) are not consumed locally (or minimally), and have to be marketed to earn money to buy subsistence food. In absence of markets and transportation (to get cash crops out, and rice in), it is more economical and logical to focus on growing one's own food crops first.

Three main points are worth noting from the history of *tsabo* diffusion in Ivoloïna valleys (Rakotondratandra, 2021). Firstly, state-led initiatives took all measures (i.e. on-farm technical training and follow-up, road rehabilitation, creation of marketing cooperatives, and integration to foreign market agreements) (table V) to better organize the planting and marketing of the aforementioned four cash crops since the 1950s. Consequently, these crops shaped the landscapes around Betampona Reserve. Secondly, three conjunctural factors led to the collapse of *tsabo* farming in the Ivoloïna and Ifontsy valleys since the 1980s. At the international level, prices of export crops from the African, Caribbean, and Pacific (ACP) countries tended to decrease (Ranarivony, 1999). At the national level, the political decision of the Malagasy State (under pressure of the International Monetary Fund, World Bank and international lenders) to liberalize the agricultural sector as part of the 1980-90s Structural Adjustment Programs (SAP) provoked a rural crisis in remote areas like Ivoloïna, i.e. a worsening of geographical isolation, insecurity and poverty, and a total disorganization of marketing channels for agricultural products (Rakotondratandra, 2021). As a result of State budget deficits (Hugon, 1988), in fact, roads lacked maintenance and rural isolation increased, which gave less room for producers to negotiate the price of their produce while allowing middlemen from getting high profit margins (Razafimandimby, 1997). At the local level, finally, frequent cyclones destroyed *tsabo* plantations as well as damaged roads and bridges, further weakening the farmers who already suffered from the end of the State-led agricultural extension initiatives within the framework of the SAP (Rakotondratandra, 2021). Thirdly, non-governmental programmes (2000s to 2018) which substituted for the State ones privileged members of associations and the diffusion of *tsabo* but had little interest in promoting animal- or rice-based agroforestry and they made no attempt to orga-

nize the marketing of agricultural products (table V). Moreover, some projects' stakeholders fear for the spread of potentially invasive *tsabo* species if producers plant them within or close to the Reserve's PZ. Such strategies did not encourage the scaling up of *tsabo* farming as an alternative to *tavy*. Faced with the aforementioned rurality crisis, in fact, the price of imported rice from Toamasina market continued to increase whereas that of *tsabo* produce from Betampona region dropped enormously. As a result, many Betampona producers converted their *tsabo* fields into *tavy* mainly for rice production. Indeed, respondents who no longer wish to establish new *tsabo* fields or scale up their existing ones cited the problems of marketing (19.8% of answers) and transportation (12.2% of answers) as their limiting factors (table II). In 2018, for instance, green vanilla beans were sold 10,000 Ariary (about 3 dollars) a kilogram on farms while the price of dried vanilla reached 600 dollars in Europe (Rakotondratandra, 2021). In this context, Betampona producers continued practicing *tavy* as the surrounding valleys were too small to allow them to extend irrigated rice farming at a large scale. More than 62% of the sample households relied on *tavy* to produce rice which covered up to 21% of the total surface area of farms, i.e. 60% of that of the sample rice fields (Rakotondratandra, 2021). This was unfavourable to the large-scale adoption of *tsabo*, for farmers voluntarily left the available hills *tanety* and slopes lie fallow until the next cycle of *tavy*. Despite the availability of *tanety*, 15.3% of the answers provided by respondents who no longer wished to establish/extend *tsabo* farming considered the lack of land as a constraining factor (table II).

Previous investigations carried out in African countries (Russel and Franzel, 2004) and also in Colombia (Heath and Binswanger, 1996) insisted on the importance of political decisions, absence or lack of development of markets and infrastructure in encouraging or discouraging farmers to adopt agroforestry technologies. In line with these findings, our research focusing on the Betampona context confirms the initial factor (3) according to which the ways the target agricultural technology is communicated and diffused as well as the factor (4) advancing that the context in which this technology is integrated during the diffusion process impacts the producers' decision to adopt it or not.

Since our results show that economic reasoning is not enough to explain why Betampona farmers resist abandoning *tavy*, an anthropological one may help do so. The *Betsimisaraka* are the dominant ethnic group in this region and considers *tavy* a part of its cultural identity (Hume, 2006). Despite its ban since the promulgation of the code of 305 articles in 1881, rainfed-rice and *tavy* – introduced to Madagascar during the first millennia AD by Austronesian immigrants (Beaujard, 2011) – are still widespread nowadays for it expresses more than a farming technique, incorporating religious meanings symbolizing farmers' relation to God, to the deceased ancestors and to all the spirits inhabiting the landscape (Vicariot, 1970). Rice farmed on *tavy* involves cults, taboos and offerings to the spirits at different stages of the production, i.e. before clearing, burning and seeding the land, before harvesting ears, and finally before trans-

porting paddy to the village (Fanony, 1975; Hume, 2005). Such rituals are not practised and required for irrigated rice. This makes *tavy* elimination very difficult because, for a *Betsimisaraka* farmer, abandoning this lifestyle also means giving up a part of his identity (Hume, 2006). This is why, despite the mediocrity of the yield, Betampona producers continue *tavy* for their psychological consolation to get rice, a product that allows them to honour their cultural values and ancestors, and which consumers want (Rakotondratandra, 2021). Over time, rice became both the Malagasy staple food and an essential ingredient used for the accomplishment of some *Betsimisaraka* community rituals, namely the *laza* (circumcision) and the *tsaboraha* described previously (Lahady, 1979). Owing to the importance of rice in the cultural and daily life of the *Betsimisaraka*, its availability also determines *tsabo*-based agroforestry dynamics. Research in different locations in Madagascar help confirm this thesis.

Osterhoudt (2017) concluded that Imorona producers in Northern Madagascar care very much for their vanilla-based agroforestry. Each field has sacred sites (tomb, big rocks, etc.) which connect the owner's family members with the spirits and their deceased ancestors; their family histories are traced through daily works on the field (weeding, harvest, etc.). Besides, vanilla agroforestry allows the owners to meet their needs (including the purchasing of both rice and children's toys) while insuring their descendants' access to resources, namely land and vanilla vines, thanks to their prestige in society. For these reasons, Imorona producers never turn their vanilla agroforestry to *tavy* for paddy production, hence only 3% of the total surface area of this county are occupied by upland rice against 29% for agroforestry, 13% for secondary forests and 19% for natural forests.

While focusing on Andapa producers in Northeastern Madagascar, Laney and Turner (2015) noticed that farmers continue doing *tavy* for rice production even though commercial crops (clove, vanilla and coffee) are much more profitable in terms of income generation. To explain this dual persistence, these authors advanced the social relations of property hypothesis according to which the utilization of rice is socially controlled while that of liquidity is not. In fact, rice constitutes a solid capital that is difficult to access whereas cash generated from export crops can easily be expended for the daily needs of the farmer household, for the caring of extended family members during hard times and for unwise utilization just to show one's social prestige. Our results confirm Laney and Turner's findings as rice availability effectively influences Betampona farmers' attitude toward *tsabo*-based agroforestry. In other words, they reserve their lands to *tsabo* plantations only if they have access to rice. So, unless projects promoting the large-scale extension of *tsabo*-based agroforestry as a substitution to *tavy* are able to both resolve the above-mentioned rurality crisis and ensure a steady and ample supply of rice, they would fail. Instead, we recommend the diffusion of *tavy boka* which is an innovative agroforestry system that can associate *tsabo* trees with rice farming without using fire.

Conclusion

This research shows that 63% of respondents from villages located in the buffer zone around Betampona Reserve still do *tavy* for rice production, and 20% to 43% of them no longer wish to establish a new *tsabo*-based agroforestry nor to extend their old ones. It concludes that the impediments to the large-scale adoption of *tsabo* as an alternative to *tavy* have structural as well as cultural dimensions. A series of unfavourable historical events, political decisions, and diffusion strategies provoked a rurality crisis (geographic isolation, increased insecurity and poverty, complete disorganization of market channels for agricultural produce) that discourages farmers from extending their *tsabo*. As *tavy* and rainfed rice define the local cultural identity, farmer prioritize rice production by this method to ensure subsistence and livelihoods.

Acknowledgement

I address my gratitude to Madagascar Fauna and flora Group (MFG) for providing me with advice and logistical supports as well as for collaborating with intern-students from ISSEDD (Institut Supérieur des Sciences Agronomiques et du Développement Durable) of the University of Toamasina to assist me during data collections in the buffer zones around Betampona Reserve in 2018. I also thank my PhD co-advisor, Dr. Christoffel Den Biggelaar (Appalachian State University), for correcting this article.

Source of funding

This research was self-funded and carried out within the framework of the preparation of my doctoral dissertation at the University of Antananarivo-Madagascar.

Data access

In application of the FAIR principle, the sources of the data used in my article are freely accessible via the DOI :

<https://doi.org/10.5281/zenodo.8164803>

It is hoped that the author will be informed and cited at the time of use, and that the article and dataset will be cited.

References

- Armstrong A., Fischer R., Huth A., Shugart H., Fatoyinbo T., 2018. Simulating Forest Dynamics of Lowland Rainforests in Eastern Madagascar. *Forests*, 9 (4): 214. <http://dx.doi.org/10.3390/f9040214>
- Beaujard P., 2011. The first migrants to Madagascar and their introduction of plants: linguistic and ethnological evidence. *Azania: Archaeological Research in Africa*, 46 (2): 169-189. <http://dx.doi.org/10.1080/0067270X.2011.580142>
- Bernard H. R., 2006. *Research methods in anthropology. Qualitative and quantitative approaches* (4th edition). Lanham/New York/Toronto/Oxford, ALTAMIRA Press, 803 p.

- Berton S., Billaz R., Burger P., Lebreton A., 2012. Agroécologie, une transition vers des modes de vie et de développement viables. Paroles d'acteurs. Groupe de Travail Désertification. Viols-le-Fort, France, Éditions Cari, 96 p. <https://www.cariassociation.org/content/download/16774/358057/version/3/file/GTD%20Agro%C3%A9cologie%20Parole%20d%27acteurs.pdf>
- Bing J.-B., 2015. Agroforêt : formes et pratiques héritées en Indonésie et à Madagascar. *Le Globe. Revue Genevoise de Géographie*, 155 : 89-96. <http://dx.doi.org/10.3406/globe.2015.7378>
- Birkinshaw C., 2002. Réserve Naturelle Intégrale de Betampona. *Ravintsara*, 1 (1) : 20-22. <http://www.mobot.org/MOBOT/Research/madagascar/Vol1Issi.pdf>
- Bureau National de Coordination REDD+, 2016. Analyse des moteurs de déforestation et de dégradation dans les éco-régions des forêts humides de l'Est et des forêts sèches de l'Ouest de Madagascar. Rapport n° 05/16/MEEMF/SG/BNC-REDD. https://www.google.com/url?esrc=s&q=&rct=j&sa=U&url=https://bnc-redd.mg/images/documents/rapports/Rapport_final_MoteursdeLaDeforestationetDegradationdesforets.pdf&ved=2ahUKewjYsN_VqLv2AhXlnVwKH-dkcB7lQFnoECAEQAg&usg=AOvVaw2FixNTPgzeRQVqJhGB-diu8
- Downey M. G., 2012. Toward lasting reforestation: guiding production strategies in agroforestry nurseries around Ranomafana National Park, Madagascar. Master thesis, Duke University, USA, 36 p. <https://hdl.handle.net/10161/5375>
- Fanony F., 1975. La riziculture sur brûlis (tavy) et les rituels agraires dans la région de Mananara-Nord. *Terre Malgache*, 17 : 29-48. http://madarevues.recherches.gov.mg/IMG/pdf/terre-mg17_2_.pdf
- Freeman K., Bollen A., Solofoniaina F. J. F., Andriamiarinoro H., Porton I., et al., 2014. The Madagascar Fauna and Flora Group as an example of how a consortium is enabling diverse zoological and botanical gardens to contribute to biodiversity conservation in Madagascar. *Plant Biosystems – An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology: Official Journal of the Societa Botanica Italiana*. 148 (3): 570-580. <http://dx.doi.org/10.1080/11263504.2014.900125>
- Freudenberger K., 2010. Paradise lost? Lessons from 25 years of USAID environment programs in Madagascar. Washington, USA, USAID, 126 p. <https://www.usaid.gov/madagascar/document/paradise-lost-lessons-25-years-environmental-programs-madagascar>
- Ganzhorn J. U., Lowry II P. P., Schatz G. E., Sommer S., 2001. The biodiversity of Madagascar: one of the world's hottest hotspots on its way out. *Oryx*, 35 (4): 336-338. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3008.2001.00201.x>
- Gay des Combes J. M., 2017. Improving slash-and-burn agriculture in Central Menabe, Madagascar. Thèse de doctorat, École polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse, 208 p. https://infoscience.epfl.ch/record/231940/files/EPFL_TH7839.pdf
- Ghulam A., 2014. Monitoring Tropical Forest Degradation in Betampona Nature Reserve, Madagascar Using Multisource Remote Sensing Data Fusion. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7 (12): 4960-4971. www.ieee.org
- Heath J., Binswanger H., 1996. Natural resource degradation effects of poverty and population growth are largely policy-induced: the case of Colombia. *Environment and Development Economics*, 1 (1): 65-84. http://journals.cambridge.org/abstract_S1355770X00000383
- Hugon P., 1988. The impact of adjustment policy in Madagascar. *IDS Bulletin*, 19 (1): 43-50. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1759-5436.1988.mp19001006.x>
- Hume D. W., 2005. Agriculture in Madagascar: conservation and cultural meaning of rice. PhD dissertation, University of Connecticut, USA, 122 p. <https://www.proquest.com/docview/305011134?pq-origsite=gscholar&fromopenview=true>
- Hume D. W., 2006. Swidden agriculture and conservation in Eastern Madagascar: stakeholder perspectives and cultural belief systems. *Conservation and Society*, 4 (2): 287-303. <https://www.jstor.org/stable/26396662>
- IMF, 2017. Republic of Madagascar – Economic Development Paper (Country Report No. 17/225). Washington, USA, International Monetary Fund, 32 p. <https://www.imf.org/en/Publications/CR/Issues/2017/07/18/Republic-of-Madagascar-Economic-Development-Documents-45099>
- Kabwe G., 2010. Uptake of agroforestry technologies among smallholder farmers in Zambia. Doctoral dissertation, Lincoln University, New Zealand, 246 p. https://researcharchive.lincoln.ac.nz/bitstream/handle/10182/2970/Kabwe_PhD.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Karlsson L., 2018. Scaling up agroforestry: potential, challenges and barriers. A review of environmental, social and economic aspects at the farmer, community and landscape levels. Stockholm, Sweden, Agroforestry Network founded by Vi-skogen, 85 p. <https://agroforestrynetwork.org/hem-sida.eu/wp-content/uploads/2018/09/Scaling-up-agroforestry-Potential-Challenges-and-Barriers.pdf>
- Lahady P., 1979. Le culte betsimisaraka et son système symbolique. Fianarantsoa, Madagascar, Librairie Ambozontany, 279 p.
- Laney R., Turner B. L., 2015. The persistence of self-provisioning among smallholder farmers in Northeast Madagascar. *Human Ecology*, 43: 811-826. <https://doi.org/10.1007/s10745-015-9791-8>
- Mariel J., Carrière S. M., Penot E., Danthu P., Rafidison V., et al., 2021. Exploring farmers' agrobiodiversity management practices and knowledge in clove agroforests of Madagascar. *People and Nature*, 3 (4): 914-928. <https://doi.org/10.1002/pan3.10238>

Messerli P., 2003. Alternatives à la culture sur brûlis sur la Falaise Est de Madagascar : stratégies en vue d'une gestion plus durable des terres. Thèse de doctorat, Université de Berne, Suisse, 384 p. https://www.researchgate.net/publication/234091806_Alternatives_a_la_culture_sur_bruilis_sur_la_Falaise_Est_de_Madagascar_strategies_en_vue_d'une_gestion_plus_durable_des_terres

Monographie d'Ambodiriana, 2004 et 2017. Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche, Madagascar.

Monographie de Sahambala, 2004 et 2017. Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche, Madagascar.

Nambena J., 2004. Analyse de la subsistance paysanne dans un système de production en crise et identification participative de stratégies durables d'adaptation. Cas de Beforona, versant oriental de Madagascar. Thèse de doctorat, Ruprecht-Karls-Universität, Allemagne, 290 p. <https://doi.org/10.11588/heidok.00004563>

Osterhoudt S., 2017. Vanilla landscapes: meaning, memory, and the cultivation of place in Madagascar. New York, USA, The New York Botanical Garden, 197 p. https://www.academia.edu/42748818/Vanilla_Landscapes_Meaning_Memory_and_the_Cultivation_of_Place_in_Madagascar

Quandt A. K., 2017. Building livelihood resilience in semi-arid Kenya: what role does agroforestry play? Doctoral dissertation, University of Colorado, USA, 362 p. https://scholar.colorado.edu/concern/graduate_thesis_or_dissertations/0z708w44g

Rakotomanandraisoa B., 2004. Intégration de la culture fruitière pour améliorer le système agroforestier traditionnel (tanimboly) de la région de Beforona. Mémoire d'ingénieur, Université d'Antananarivo, Madagascar, 123 p. http://madadoc.irenela.edu.mg/documents/10987_Rakotomanandraisoa_Bakolinirina.pdf

Rakotondratandra D. R., 2021. Diffusion et adoption de l'agroforesterie dans les exploitations familiales à la périphérie de la Réserve Naturelle Intégrale de Betampona (Madagascar). Thèse de doctorat, Université d'Antananarivo, Madagascar.

Ranarivony R., 1999. La pénétration des produits africains sur les marchés européens de 1957 à nos jours. Thèse de doctorat, Université Marc Bloch-Strasbourg-II, France.

Razafoamandimby L., 1997. L'ajustement dans le secteur agricole : insuffisance des réformes de prix et faiblesse de la compétitivité. Revue Économie de Madagascar, (2) : 13-36. https://core.ac.uk/display/7358997?utm_source=pdf&utm_medium=banner&utm_campaign=pdf-decoration-v1

Russel D., Franzel S., 2004. Trees of prosperity: agroforestry, markets and the African smallholder. *Agroforestry Systems*, 61: 345-355. <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000029009.53337.33>

Schroth G., da Fonseca G. A. B., Harvey C. A., Vasconcelos H. L., Gascon C., Izac A.-M. N., 2004. Introduction: the role of agroforestry in biodiversity conservation in tropical landscapes. In: Schroth G. *et al.* (eds). *Agroforestry and biodiversity conservation in tropical landscapes*, Washington/Covelo/Londres, Island Press, 1-12.

Sood K. K., 2005. Role of social aspects in extent of on-farm tree growing in subsistence agroforestry systems of Western Himalaya. *Small-scale Forest Economics, Management and Policy*, 4(3): 293-310. <https://doi.org/10.1007/s11842-005-0018-5>

Styger E., Rakotoarimanana J. E. M., Rabevohitra R., Fernandes E. C. M., 1999. Indigenous fruit trees of Madagascar: potential components of agroforestry systems to improve human nutrition and restore biological diversity. *Agroforestry Systems*, (46): 289-310. <https://doi.org/10.1023/a:1006295530509>

Vicariot F., 1970. Le problème du tavy en pays Betsimisaraka (Madagascar). Analyse préliminaire. *Cahiers de l'ORSTOM, Série Biologie*, 14 : 3-12. <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:17578>

Vieilledent G., Grinand C., Rakotomalala F. A., Ranaivosoa R., Rakotoarijaona J.-R., *et al.*, 2018. Combining global tree cover loss data with historical national forest cover maps to look at six decades of deforestation and forest fragmentation in Madagascar. *Biological Conservation*, 222: 189-197. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.04.008>

Rakotondratandra – Author's contributions

Contributor role	Contributor names
Conceptualization	D. R. Rakotondratandra
Funding Acquisition	D. R. Rakotondratandra
Supervision	D. R. Rakotondratandra
Writing – Original Draft Preparation	D. R. Rakotondratandra
Writing – Review & Editing	D. R. Rakotondratandra

Bois et Forêts des Tropiques - Revue scientifique du Cirad -
© Bois et Forêts des Tropiques © Cirad



Cirad - Campus international de Baillarguet,
34398 Montpellier Cedex 5, France
Contact : bft@cirad.fr - ISSN : L-0006-579X

Low-cost agroforestry technologies for climate change mitigation and adaptation in Sub-Saharan Africa: A review

Émeline S. P. ASSÈDÉ^{1,3}
Samadori S. H. BIAOU^{1,3}
Paxie W. CHIRWA²
Jesugnon F. M. F. TONOUÉWA³
Eduardo VALDÉS VELARDE⁴

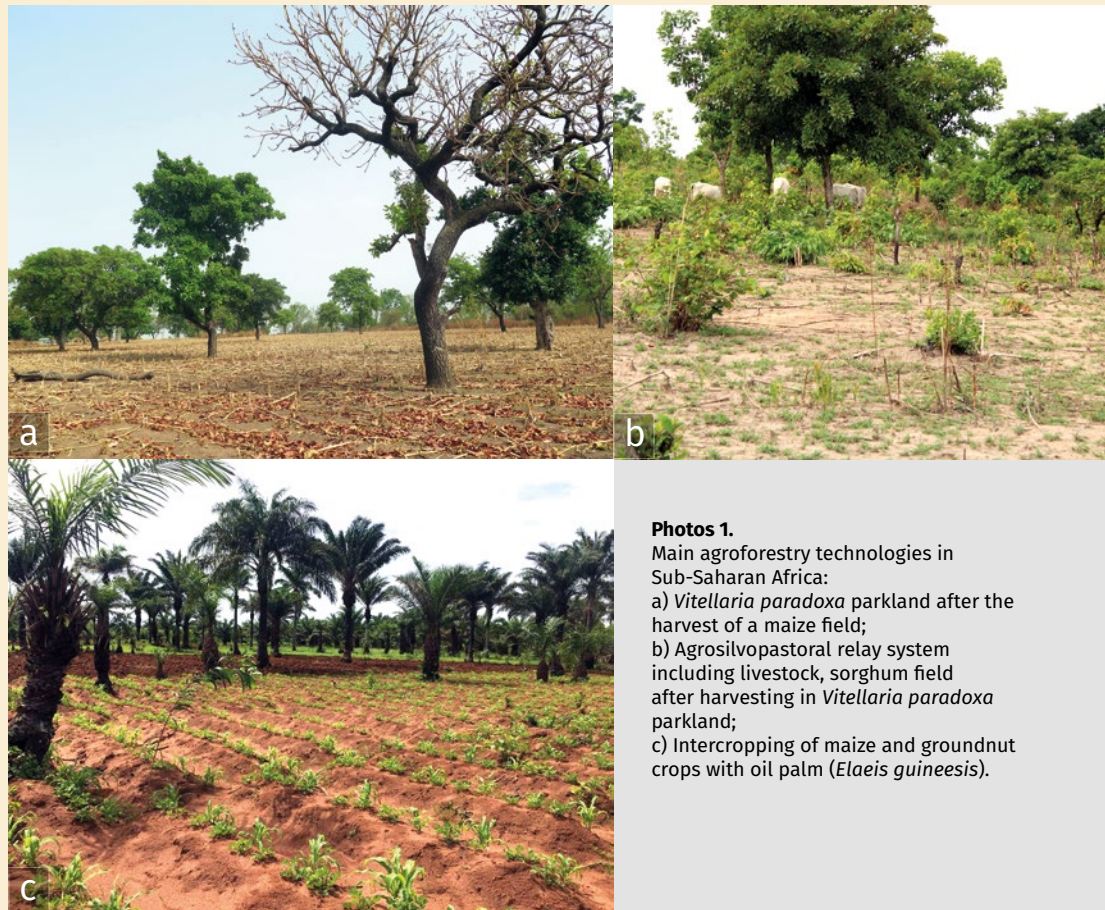
¹ University of Parakou
Faculty of Agronomy
Department of management
of Natural Resources
BP 123, Parakou
Benin

² University of Pretoria
Department of Plant and Soil
Sciences
1121 South Street, Pretoria
South Africa

³ University of Parakou
Laboratory of Ecology,
Botany and Plant biology
03 BP 125, Parakou
Benin

⁴ Chapingo Autonomous University
Agroforestry Center for Sustainable
Development
Plant Science Department
Km 38.5 Carretera Fed. México-
Texcoco s/n
Col. Chapingo, Texcoco,
Estado de México
Mexico, 56230
Mexico

**Auteur correspondant /
Corresponding author:**
Jesugnon F. M. F. TONOUÉWA –
murielle.tonouewa@leb-up.org /
tonouewam@gmail.com



Photos 1.

Main agroforestry technologies in Sub-Saharan Africa:
a) *Vitellaria paradoxa* parkland after the harvest of a maize field;
b) Agrosilvopastoral relay system including livestock, sorghum field after harvesting in *Vitellaria paradoxa* parkland;
c) Intercropping of maize and groundnut crops with oil palm (*Elaeis guineensis*).

Doi : 10.19182/bft2023.356.a36908 – Droit d'auteur © 2023, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 31 mars 2022 ; date d'acceptation : 12 septembre 2022 ; date de publication : 1^{er} juin 2023.



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

Citer l'article / To cite the article

Assédé E. S. P., Biaoua S. S. H., Chirwa P. W., Tonouéwa J. F. M. F., Valdés Velarde E., 2023. Low-cost agroforestry technologies for climate change mitigation and adaptation in Sub-Saharan Africa: A review. Bois et Forêts des Tropiques, 356: 29-42. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2023.356.a36908>

RÉSUMÉ

Techniques agroforestières à faible coût pour l'atténuation du dérèglement climatique et l'adaptation à celui-ci en Afrique subsaharienne

L'agroforesterie englobe un large éventail de techniques et de pratiques ayant un potentiel pour améliorer la productivité des exploitations agricoles avec un minimum d'impact sur l'environnement, dans le contexte de l'atténuation du dérèglement climatique et de l'adaptation à celui-ci. Notre étude examine la pertinence des techniques et pratiques agroforestières en Afrique subsaharienne (ASS) pour l'atténuation et l'adaptation au dérèglement climatique. Nous avons inventorié 173 ouvrages scientifiques et 62 ont été examinés. Nos résultats indiquent que des techniques accomplies et bien développées sont utilisées dans les systèmes agroforestiers en Afrique subsaharienne. Elles peuvent être classées en quatre groupes principaux (cultures intercalaires, jachères améliorées, paillage et parcs) et sept sous-groupes (cultures de relais, cultures intercalaires de haies, boisements en rotation, jachères en taillis, régénération gérée par les agriculteurs, domestication d'arbres à la ferme par poly-propagation et paillage) en fonction de facteurs tels que l'origine et l'utilisation des arbres et les types d'association arbres-cultures. Notre étude a montré que l'effet positif maximal de l'agroforesterie en mode parc est obtenu lorsque la densité des arbres se situe entre 20 et 40 arbres/ha, puisque nos résultats indiquent une augmentation de la production végétale de 915,9 kg/ha. En outre, dans l'ensemble, la rentabilité du travail pour les techniques utilisant des arbres fertilisants dépasse de 17 % la rentabilité pour les jachères naturelles. Les techniques agroforestières contribuent grandement au programme REDD+, mais les meilleures techniques avec le meilleur rapport coût-bénéfice et un effet conséquent pour l'atténuation et l'adaptation semblent être les systèmes de culture intercalaire et de jachère améliorée. Cependant, nous avons constaté un manque de précision et de détail quant aux coûts économiques, sociaux et environnementaux spécifiques au contexte pour les différentes techniques. Pour que les agriculteurs puissent prendre des décisions utiles et rationnelles dans le cadre de l'adoption de l'agroforesterie, les recherches à venir doivent veiller à détailler les coûts économiques, sociaux et environnementaux de chaque technique dans chaque contexte spécifique.

Mots-clés : agroforesterie, innovation, impact, coût, Afrique subsaharienne.

ABSTRACT

Low-cost agroforestry technologies for climate change mitigation and adaptation in Sub-Saharan Africa: A review

Agroforestry encompasses a large set of techniques and practices that have the potential to improve farm productivity with minimum environmental impacts in the context of climate change mitigation and adaptation (CCMA). In this paper, we discuss the relevance of agroforestry technologies and practices for CCMA in Sub-Saharan Africa (SSA). We recorded 173 scholarly works and reviewed 62. Our findings indicate that comprehensive and well-developed technologies are used in agroforestry systems in SSA. They can be classified into four main groups (intercropping, improved fallows, mulching and parkland) and seven sub-groups (relay cropping, hedgerow intercropping, rotational woodlots, coppicing fallows, farmer-managed regeneration, on-farm tree domestication through poly-propagation and mulching) based on factors including the origins and uses of the trees and the types of tree-crop association. Our review showed that the maximum positive effect of parkland agroforestry is obtained when tree density ranges from 20 to 40 trees/ha, indicating an increase in crop production of 915.9 kg/ha. Furthermore, overall, the returns to labour of techniques involving fertilizer trees outperform those for natural fallows by 17%. Agroforestry techniques contribute substantially to the REDD+ program, but the best techniques with the highest cost-benefit-ratio and a substantial CCMA effect appear to be the intercropping and improved fallow systems. However, we observed a lack of detailed context-specific economic, social and environmental costs for the different techniques. For effective and rational decision-making by farmers in their adoption of agroforestry, further research should focus on filling in the detailed economic, social and environmental costs of each technology in each specific context.

Keywords: agroforestry, innovation, impact, cost, Sub-Saharan Africa.

RESUMEN

Técnicas agroforestales de bajo coste para la mitigación del cambio climático y la adaptación al mismo en el África subsahariana Revisión

La agroforestería engloba un amplio conjunto de técnicas y prácticas que pueden mejorar la productividad de las explotaciones con un impacto medioambiental mínimo en el contexto de la mitigación del cambio climático y la adaptación al mismo (CCMA). En este artículo se analiza la relevancia de las técnicas y prácticas agroforestales para la CCMA en el África subsahariana (SSA). Registramos 173 trabajos académicos y revisamos 62. Nuestras conclusiones indican que en los sistemas agroforestales del SSA se utilizan técnicas completas y bien desarrolladas. Se pueden clasificar en cuatro grupos principales (cultivos intercalados, barbechos mejorados, acolchados y zonas verdes) y siete subgrupos (cultivos rotativos, cultivos intercalados en setos, parcelas forestales rotativas, barbechos de brote de cepa, regeneración gestionada por el agricultor, domesticación de árboles en la explotación mediante polipropagación y acolchado) en función de factores como los orígenes y usos de los árboles y los tipos de asociación árbol-cultivo. Nuestra revisión mostró que el máximo efecto positivo de la agroforestería en zonas verdes se obtiene cuando la densidad de árboles oscila entre 20 y 40 árboles/ha, lo que indica un aumento en la producción de cultivos de 915,9 kg/ha. Además, en conjunto, los rendimientos del trabajo de las técnicas con árboles fertilizantes superan en un 17 % a los de los barbechos naturales. Las técnicas agroforestales contribuyen sustancialmente al programa REDD+, pero las mejores técnicas con el mayor ratio coste-beneficio y un efecto CCMA sustancial parecen ser los sistemas de cultivo intercalado y barbecho mejorado. Sin embargo, observamos una falta de costes económicos, sociales y medioambientales detallados y específicos de cada contexto para las distintas técnicas. Para que los agricultores tomen decisiones eficaces y racionales en su adopción de la agroforestería, la investigación futura debería centrarse en completar los costes económicos, sociales y medioambientales detallados de cada técnica en cada contexto específico.

Palabras clave: agroforestería, innovación, impacto, coste, África subsahariana.

Introduction

Agroforestry is among the common agricultural systems in Sub-Saharan Africa (SSA) supporting more than 500 million people with a wide range of crops and livestock, and diverse cash income-generating activities. It is a system in which trees are sequentially or simultaneously integrated with crops and/or livestock with the intention of developing a more sustainable form of land use that can improve farm productivity (FAO, 2020; ICRAF, 2017; WOCAT, 2020). Yet, its potential contribution to local and national economies is generally under-estimated (Leakey, 2017).

The burgeoning population, land degradation, reduction in land cover that have been exacerbated by climate change have resulted in rapidly declining soil fertility and decreasing yields in agricultural systems of Sub-Saharan Africa. In Sub-Saharan Africa, soil fertility depletion is at alarming level, especially in small-scale land use system (FAO, 2020). Agricultural systems in Africa are particularly vulnerable to climate change because much of crop production is directly dependent on rainfall (Haile, 2005). For example, it was estimated that 89% of cereals in Sub-Saharan Africa are rainfed (Cooper *et al.*, 2008), thereby making climate a key factor in food security (Gregory *et al.*, 2005). Despite the progress made since the World Food Summit 1996, serious food insecurity persists, exacerbated by climate variability effects.

Thus, to maintain an appropriate balance between conservation and productivity, an optimized agroforestry system requires an integrated management with low-cost technologies and practices – maintaining soil fertility, increasing the yield, and household wellbeing with minimum environmental impacts in the context of climate change mitigation and adaptation.

This study, based on a literature review, discusses the relevance of different agroforestry technologies and practices for climate change mitigation and adaptation in Sub-Saharan Africa, with an emphasis on associated costs for biodiversity conservation, improvement of crops productivity, mitigation of environmental challenges and improvement of the wellbeing of the local population. Specifically, it aims to: 1) characterize successful technologies and practices developed in agroforestry for climate change mitigation and adaptation; 2) assess their socioeconomic and environmental impacts; 3) determine two technologies with the lowest economic cost. We aim to answer the following research questions: 1) How successful are agroforestry technologies and practices developed in Sub-Saharan Africa for the mitigation and adaptation to climate change? 2) Does the adoption of agroforestry technologies and practices for climate change mitigation and adaptation depend on the social, environmental, or economic costs of their implementation?

Method

Study area

Sub-Saharan Africa refers to African countries and territories that lie fully or partially south of the Sahara and encompasses four sub-regions mainly delineated based on their climate and vegetation: Eastern Africa, Middle Africa, Southern Africa, and Western Africa (figure 1). Sub-Saharan Africa has a wide variety of climatic zones or biomes with generally a dry winter season and a wet summer season. These include the Sahel (hot semi-arid climate, e.g. Mali, Niger, Chad and Sudan), savannas (West and East Sudanian savannas), tropical rainforests (West and Central Africa), woodlands, savannas, and grasslands mosaics (Eastern Africa), Afromontane forests, grasslands, and shrublands (Eastern Africa), the Western and Southern Congolian forest-savanna mosaic (transition zones between the tropical forests and the miombo woodland belt), the Namib and Kalahari Deserts (South-Western Africa), and the Cape Floristic Region at Africa's southern tip (subtropical and temperate forests, woodlands, grasslands, and shrublands).

The population of Sub-Saharan Africa was estimated at 1.094 billion in 2020 and projected to double by 2050, reaching 2.118 billion, with a growth rate of 2.65% between 2015-2020 (World Population Prospects, 2019). Countries with the fastest growth rate (> 3%) are mostly from Middle Africa (i.e., Angola, Chad, Democratic Republic of the Congo, and Equatorial Guinea), in contrast to Southern Africa's countries. In the other sub-regions, Niger (Western Africa), Burundi and Uganda (Eastern Africa) also have a higher growth rate (>3%) than the regional average.

Agriculture in Sub-Saharan Africa represents 15.3% of total Gross Domestic Product (GDP) and employed more than half of the total workforce in 2019 (World Bank, 2020). Most agricultural activity is subsistence farming, making this activity highly vulnerable to climate change. Maize is the most important staple crop across Sub-Saharan Africa, and other important staples include rice (Eastern and Western Africa), potatoes (Eastern and Central Africa), sweet potatoes (Eastern Africa), cassava (Western and Eastern Africa) and plantains (Eastern and Central Africa) (OECD/FAO, 2016). Livestock production systems is also largely extensive, with poultry contributing a substantial share of livestock production value across the entire region (12% in Eastern Africa to 45% in Central Africa and Southern Africa) (OECD/FAO, 2016). Other significant contributions include pasture based ruminant production in semi-arid areas and game meat in Central Africa.

Concept clarification

In this article, the expression “agroforestry technology” is used to designate all the procedures and methods used in agroforestry.

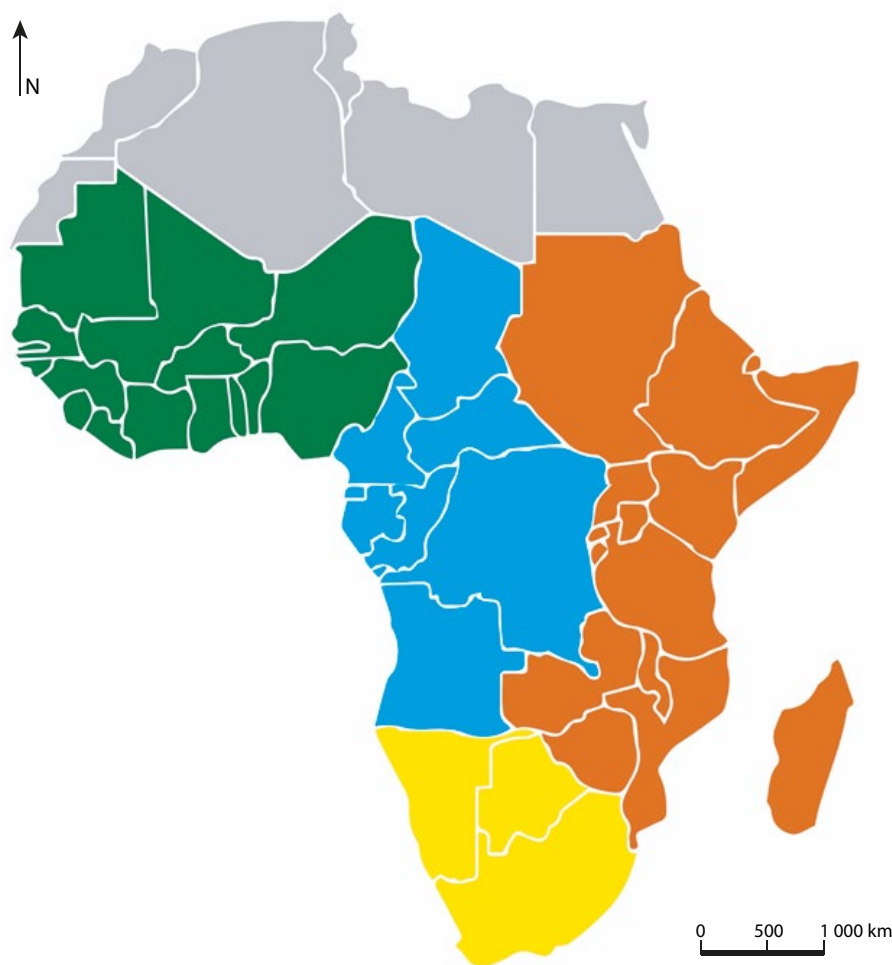


Figure 1.

Geographical map of Sub-Saharan Africa showing the four sub-regions: Eastern Africa (orange), Western Africa (dark green), Middle Africa (blue), and Southern Africa (yellow). Note: The United Nations geoscheme for Africa excludes Sudan from Sub-Saharan Africa, whereas the African Union's definition includes Sudan but instead excludes Mauritania. Both are included in this map. Source: The Statistics Division of the United Nations.

Data collection and analysis

Bibliometric data and publications on Technologies in agroforestry of Sub-Saharan Africa was collected using the Scopus search engine in August 2020. Scopus includes a wide range of journals (Leydesdorff *et al.*, 2010) and represents one of the largest databases on scientific literature (Djalante, 2018). It provides wide-ranging access to bibliographic and citation information (Wraith *et al.*, 2020). The different components of a bibliographic record are authors, author affiliation, keywords, year of publication, and journal in which the document is published (Noyons, 2001). We first searched for relevant publications using a combination of syntax: “Agroforestry technologies” AND “Sub-

Saharan Africa” AND “Impact” in their titles, abstracts or keywords, without restriction to the publication period. However, the search results were restricted to publications concerning the 46 members states of Sub-Saharan Africa, written in English or French. Publications that did not relate to agroforestry technologies were excluded. Duplicate files were ultimately removed (Wraith *et al.*, 2020). Results were downloaded in BibTeX format for further processing and analysis. This database was expanded with search results from Google Scholar search engine using the same keywords (Halevi *et al.*, 2017; Younger, 2010). All reference lists included in the selected documents were considered for additional potentially relevant information. The recorded Bibliometric data was analysed using CADIMA tools (Kohl *et al.*, 2018) following three steps: 1) definition of selection criteria, 2) relevant file selection based on the titles, abstract and full text screening, and 3) data extraction from the selected full texts.

We recorded 173 publications (133 and 40 from Scopus and Google Scholar, respectively). We eventually selected 62 for this study, including 72% research articles, 10% books or book chapters and 18% reports (grey literature) from the retrieved literature. The selected literature encompasses the last 28-year period, starting from 1992 to 2020. The majority of the publications (93%) focused on the description of at least

one technology, the impact on crop yield and soil fertility replenishment (52%), climate change mitigation and adaptation (25%), and the factors affecting the adoption (11%). Only 5,3% of the publication really addressed the Benefit-Cost Ratio (BCR) of the technologies developed in Sub-Saharan Africa.

The overall finding was synthesized and categorized into characteristics, impacts and successful technologies. The implications for conservation were developed from the analysis of the main finding. Within the characteristic category, we were interested in the description and classification into homogenous groups of the technologies, and tree species commonly involved. Tree species names were updated and confirmed on the platform iNaturalist

(Schmidt *et al.*, 2016). The impacts included environmental effect especially on climate change mitigation and adaptation, social effect and economic value. Available Meta-data were collected from recorded literature to compute a comprehensive graph on the total cost, Net Present Value (NPV), and the BCR of technologies. Because of the lack in detailed information on the economic, social, and environmental costs of each technology regarding specific context, we only focused on comparing the implementation cost and the BCR of the technologies in different context.

In the results of this review, we did not specifically present differences in agroforestry technologies between SSA sub-regions because of the limited number of available studies that meet the inclusion criteria. Thus, despite the differences in terms of climate and vegetation that characterize the four sub-regions of SSA, a consistent trend did not emerge to justify the presentation of the results per sub-region or a comparison between the sub-regions. Instead, we proceeded by grouping agroforestry technologies (see table I) that share alike characteristics across SSA, based primarily on the origin and uses of the tree, and the types of tree-crop association. Such a grouping also defines their social, economic and environmental functions and was guided by the nature of the study research questions.

Results

Technologies in agroforestry systems in Sub-Saharan Africa

The tree-crop combination can be either in temporal rotation or spatial mixture stand. Comprehensive and well described technologies were developed and used in the agroforestry system in SSA (AF-SSA). Despite a great variation in the terminologies, authors agreed on the main content of each technology (Dallimer *et al.*, 2018; Nyasimi *et al.*, 2017; Ouédraogo *et al.*, 2019; WOCAT, 2020). These technologies can be classified into four main groups and seven sub-groups based on factors including the origin of the tree, the objective of its use in the system, the technique of biomass introduction in the crop field and the types of tree-crop association (photos 1, figure 2 and table I).

Table I presents a summary of the main characteristics of the technologies developed and used in agroforestry system of Sub-Saharan Africa (TAF-SSA). Although the tree species used did not greatly vary from one technology to another, they were context specific and related to the main objective of farmers. Thus, an analysis of the available literature clearly identified two groups: leguminous tree species (where the focus is to reclaim degraded land

Table I.
 Summary of the main characteristics of the technologies used in Agroforestry systems in Sub-Saharan Africa (TAF-SSA).

Agroforestry technology	Other terminologies	Description	Key tree species	Authors
Fertilizer tree system	• Fertilizer tree technologies	Technology using introduced N ₂ -fixing trees essentially for soil fertility replenishment. It includes: <ul style="list-style-type: none"> • Intercropping • Improved fallows • Mulching 		Toth <i>et al.</i> , 2017
Intercropping	• Alley cropping • Hedgerow intercropping	Farming system with crops in alleys formed by leguminous trees to provide mulch and green manure: It includes: <ul style="list-style-type: none"> • Relay cropping: strip intercropping between tree rows • Hedgerow intercropping: planted hedgerows of widely spaced leguminous tree species with food crops either between the hedges, or around the edges. Trees are regularly coppiced at about 0.75 m above ground to reduce below ground competition and shading 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Gliricidia sepium</i> (Jacq.) Walp. • <i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit • <i>Elaeis guineensis</i> Jacq. • <i>Senna siamea</i> (Lam.) Erwin and Barneby • <i>Acacia auriculiformis</i> A. Cunn. ex Benth. • <i>Acacia mangium</i> Willd. • <i>Acacia tumida</i> Benth. • <i>Albizia lebbbeck</i> (L.) Benth. • Fruit trees (cocoa, coffee) 	Kang, 1997; Kant <i>et al.</i> , 2012; Mafongoya <i>et al.</i> , 2006; Nyasimi <i>et al.</i> , 2017; Vaast and Somarriba, 2014
Improved fallow	• Improved bush fallow system • Sequential tree fallow	Involve deliberately planted tree/shrub species – usually legumes – as integral components in a crop-fallow rotation (of two years for example). Usually called by the tree used, (Example: “ <i>Gliricidia fallows</i> ”). It includes: <ul style="list-style-type: none"> • Rotational woodlots: involves non-coppicing leguminous tree species • Coppicing fallow: involves leguminous tree species capable of re-sprout when cut back at the end of the fallow period 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Gliricidia sepium</i> • <i>Sesbania sesban</i> (L.) Merr. • <i>Tephrosia Vogelii</i> Hook. f. • <i>Tephrosia candida</i> DC. • <i>Cajanus cajan</i> (L.) Millsp. • <i>Calliandra calothyrsus</i> Meissner • <i>Senna siamea</i> 	Mafongoya <i>et al.</i> , 2006; Partey <i>et al.</i> , 2017a; Swamila <i>et al.</i> , 2020
Mulching	• Biomass transfer	Consists of incorporating a range of plant materials, a layer of biomass (dry or wet leguminous tree leaves) to the ground to stimulate the activity of soil biota to improve soil fertility	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Gliricidia sepium</i> • <i>Leucaena leucocephala</i> • <i>Acacia tumida</i> 	Bayala <i>et al.</i> , 2011; Ibrahim <i>et al.</i> , 2015
Parkland	• Conservation agriculture • Fodder tree technology • Evergreen agriculture	An anthropogenic vegetation assemblage derived from slow process of indigenous trees selection and density management by farmers. It includes: <ul style="list-style-type: none"> • Farmers manage regeneration • On farm tree domestication through poly-propagation 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Adansonia digitata</i> L. • <i>Borassus aethiopum</i> Mart. • <i>Faidherbia albida</i> (Del.) Chev. • <i>Hyphaene thebaica</i> (L.) Mart. • <i>Lannea microcarpa</i> Engl. & K. Krause • <i>Parkia biglobosa</i> (Jacq.) R. Br. ex G. Don • <i>Pterocarpus erinaceus</i> Poir. • <i>Pterocarpus lucens</i> Lepr. ex Guill. & Perr. • <i>Sclerocarya birrea</i> (A. Rich.) Hochst. • <i>Tamarindus indica</i> L. • <i>Vitellaria paradoxa</i> C. F. Gaertn. • <i>Ziziphus mauritiana</i> Lam. 	Bayala <i>et al.</i> , 2011; FAO, 2020; Maranz, 2009

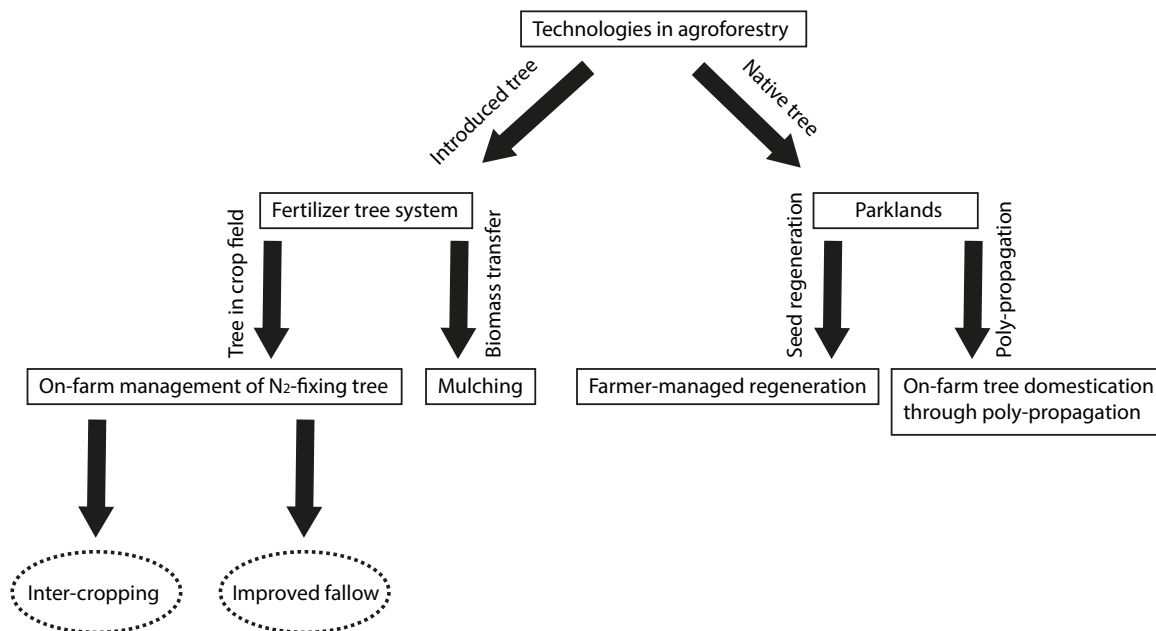


Figure 2.
Classification of the technologies used in agroforestry systems in Sub-Saharan Africa.

through replenishment of soil fertility) and multipurpose tree species, mainly indigenous tree species purposely left in the field by farmers. The focus in the latter is to provide farmers with food, additional income, fuelwood, etc. (Binam *et al.*, 2017; Swamila *et al.*, 2020).

Impacts of technologies and innovative agroforestry systems

Social impact

The trade-off between agroforestry practices and impacts often revolves around social benefits. For instance, a combination of chemical fertilizers with improved fallows was the most socially profitable technology (Maithya *et al.*, 2006). One clear observation from the production systems in Sub-Saharan Africa is that agroforestry with indigenous fruit trees enhanced both better diet and health of the local population, while improving farmers' knowledge and capacity of practicing and managing local diversity (Tchoundjeu *et al.*, 2010). The social benefits that accrue from the usage of the eco-garden system include the improvement in the local livelihoods through its potential to support diets by providing food and nutrition security and reducing poverty by creating employment opportunities (Materchera and Swanepol, 2013; Nyasimi *et al.*, 2017; Partey *et al.*, 2017b). An analysis of survey results in West Africa showed that

after the threshold of 20 trees/ha, an increase in the number of trees kept and managed on farms may increase the food consumption score (Binam *et al.*, 2017). However, there have also been several negative impacts derived from agroforestry systems. A conflict was observed between herders and farmers with the establishment of trees on cultivated lands. Fields that hitherto were "common property" and on which livestock would freely graze became more privatized. Thus, fodder previously available for livestock especially in dry season became limited requiring extra labour in herding animals (Ajayi *et al.*, 2011).

Economic impact

Agroforestry through its economic value could be seen as a means of improving farmers' livelihoods (Materchera and Swanepol, 2013). Economic analysis of pigeon peas (*Cajanus cajan*) fallows and *Gliricidia sepium* (gliricidia) fallows over six years in West Africa showed the profitability of the technology compared to natural fallows (Swamila *et al.*, 2020). The technology clearly increases the maize and groundnut yield by 200% and 350%, respectively. Globally, the returns to labour in fertilizer tree technologies outperform (17%) those in natural fallow (Degrande, 2001). In the Sahel, there is an optimal number of trees to be kept on the farm. The maximum positive effect is obtained when tree density ranges from 20 to 40/ha, indicating an increase

of crop production by 915.9 kg/ha (Binam *et al.*, 2017). In a condition of water shortage, *Sesbania sesban* (sesbania) fallow increased grain yield and dry matter production of subsequent maize per unit amount of water used. The average maize grain yields in sesbania fallow, and in continuous maize cropping without fertilizer were 3, and 1 Mg/ha with corresponding water use efficiencies of 4.3 and 1.7 kg/mm/ha, respectively (Phiri *et al.*, 2003). Total yield after two-year sesbania fallow in four cropping seasons was 12.8 t/ha compared to 7.6 t/ha for six seasons of continuous unfertilized maize (Partey *et al.*, 2017a).

The maize yield in tree-based systems is up to double (29 to 113%) in the first three years (Chirwa *et al.*, 2003; Nyadzi *et al.*, 2003). In agrosilvopastoral relay system, several studies especially in East Africa have confirmed that shrubs have an impact on milk production. The overall impact of the woodlot in terms of additional net income from milk was reported to be high, at US\$ 19.7 to US\$ 29.6 million over 15 years (Place *et al.*, 2009). There is evidence that an agroforestry system also provides off-farm incomes from the marketing of agroforestry tree products such as non-timber forest products, fuelwood and fodder for livestock, compared with subsistence agriculture (Binam *et al.*, 2017; Dallimer *et al.*, 2018; Nyasimi *et al.*, 2017; Ouédraogo *et al.*, 2019; Thorlakson and Neufeldt, 2012). An optimum of 40 trees/ha is recommended in the Sahel (Binam *et al.*, 2017). The domestication of a local fruit tree can provide an average household income of US\$ 242 a year for farmers in East Africa (Kalaba *et al.*, 2010; Tchoundjeu *et al.*, 2010). Selling of *Adansonia digitata* in Burkina Faso can generate up to US\$ 300 in three months for farmers engaged in agroforestry (Sawadogo, 2011).

Environmental impact

Environmental benefit reported from tree on farm varied with the technology (including both tree species and density). Generally, farms under agroforestry technology are more protected against severe wind and drought and are resilient to climatic variability (Kimaro *et al.*, 2016, 2019). In Tanzania, gliricidia agroforestry technology is reported to improve soil fertility, moisture retention and control soil erosion (Ouédraogo *et al.*, 2019; Swamila *et al.*, 2020). In the 2017 drought, farmers engaged in gliricidia agroforestry saved up to 75% of their crop yields (Kimaro *et al.*, 2016, 2019). Trees in parklands contribute to soil organic carbon (SOC) and carbon sequestration via photosynthesis while increasing soil fertility, air humidity and the reduction of greenhouse gas (GHG) emissions. These were demonstrated in findings of more than 100 peer-reviewed research studies on the intercropping and improved fallow with nitrogen-fixing green fertilizers, including trees and shrubs (Bayala *et al.*, 2018, 2014; Cheesman *et al.*, 2016; Partey *et al.*, 2017b; Thierfelder *et al.*, 2017). The SOC increased in the AF technologies with the best results from mulching and parkland (table II). In fact,

Table II.
 Percentage in soil organic carbon (SOC) and nitrogen (N) in various tree-based technologies in Sub-Saharan Africa.

Variable	Technology	Percentage (%)	95% confidence intervals	
			Lower	Upper
SOC	Alley cropping	20.6	6.8	34.4
	Fallow	22.8	8.6	37.1
	Mulching	39.5	20.7	8.2
	Parkland	35.5	25.1	45.9
Nitrogen	Alley cropping	32.1	8.6	55.5
	Fallow	15.3	12.1	42.7
	Mulching	32.4	4.8	60.0
	Parkland	35.5	17.2	53.8

SOC: Soil Organic Carbon. Adapted from Bayala *et al.* (2018).

AF has been recognized by IPCC as an important component in climate change mitigation (GIEC, 2007). Conservation Agriculture including tree-based cropping can contribute to 1.3-6.4 GtCO₂-eq/year by 2030 (Pachauri and Reisinger, 2007).

In most parts of SSA, agroforestry acts as a viable alternative to inorganic fertilizers in improving soil fertility. The residual effect from a short duration of improved fallow may last one to two seasons, but the effect of an eight-month fallow can last for one or more seasons, depending on the level of degradation of the soil (Amadalo *et al.*, 2003). A well-managed improved fallow system may contribute between 100 kg N/ha/year and 200 kg N/ha/year (Amadalo *et al.*, 2003). Under nutrient poor conditions, total N and SOC increased by 6-14 kg/ha/year and 2.6-194 kg/ha/year respectively (Masikati *et al.*, 2014).

Successful and low-cost agroforestry technologies for climate change mitigation and adaptation

The success of a cropping technology is evident from its adoption by farmers, and the adoption is context and site-specific. In general, the uptake of technologies is more complicated than that of annual crops (Mercer, 2004) because of the multi-components shaping farmers' decision. Despite the variety in factors determining farmers' engagement, three major constraints were highlighted to influence a rational decision-making of farmers for whatever the technology is in AF-SSA (Swamila *et al.*, 2020):

- the shift in productivity,
- the increase in profit,
- the learnability and input accessibility.

There have been few studies that focused on assessing the economic aspect of using a tree-based technology in AF-SSA. Factors affecting the adoption (including the

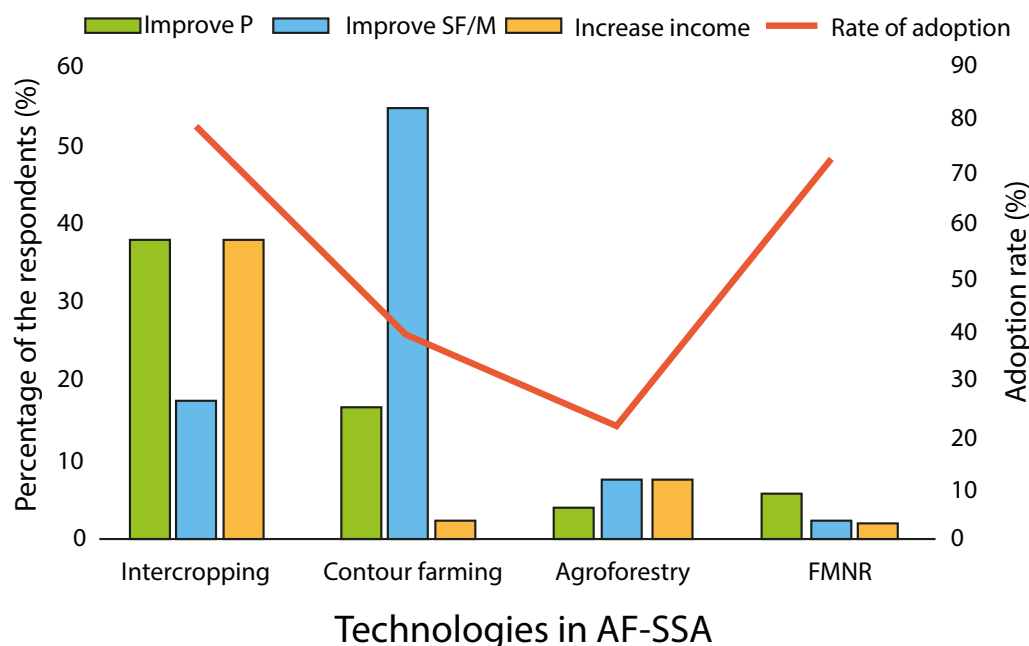


Figure 3.

Adoption rate and factor affecting the adoption of the most successful technologies in agroforestry system to mitigate climate change effects. AF-SSA: Agroforestry in Sub-Saharan Africa. Improv P: Improve productivity; Improve SF/M: Improve Soil Fertility/Moisture; FMNR: Farmer Managed Natural Regeneration. Adapted from Ouédraogo *et al.* (2019).

assessment of the cost of various inputs) of developed technologies in AF-SSA were mainly assessed through local perception. From farmers' perception, these factors vary with the technology. The figure 3 shows that soil fertility replenishment is the main factor determining the adoption of contour farming, while improving the yield and farmers income are the determinant factors for intercropping adoption. The adoption rate of the technologies decreases from the intercropping to the agroforestry (which recorded the best adoption rate), then rise to Farmer Managed Natural Regeneration.

Likewise, the social impacts of a technology are not always estimated by existing studies, though more valued sometimes by farmers. Despite the increasing positive agroecological impacts of technologies in AF-SSA, their adoption has been dismally low across all sub-Saharan African because of the sensitiveness of trialability (Mafongoya *et al.*, 2006). In general, tree-based agroforestry technologies are more negatively affected by land tenure, one of the major issues affecting agriculture in SSA (Bambio and Agha, 2018; Lawin and Tamini, 2019). Nevertheless, improved adoption rate of agri-environmental practices for climate change mitigation in the southern and western Africa were reported because of the participatory approach used (Akinnifesi *et al.*, 2008; Ouédraogo *et al.*, 2019). Intercropping (especially with *Gliricidia sepium*, *Sesbania sesban* and *Maesopsis eminii* intercropping) and improved fallows were reported with the best result both in productivity (figure 4), climate mitigation, and adoption rate (fig-

ure 3) in the SSA irrespective of the local specific conditions (Corbeels *et al.*, 2019; Haider *et al.*, 2018; Kaba *et al.*, 2017, 2019; Kaba and Abunyewa, 2021; Sileshi *et al.*, 2020; Swamila *et al.*, 2020).

Implications for sustainable agroforestry under climate change

The concept of sustainability applies to a wide range of human activities, and particularly to agriculture because of its capacity to contribute to the development and its substantial impact on the environment. It refers to a system in which the needs of the present are met without compromising the ability of future generations to meet their own needs, with reference to the environment, economic and social domains. Thus, sustainable agriculture involves the production of goods and services (economic function), the management of natural resources (ecological function) and the contribution to rural dynamics (social function) (Latruffe *et al.*, 2016). Sometimes, political sustainability is added as a fourth dimension of sustainability to capture aspects related to governance, law and justice, communication, and ethics, etc. Sustainability is also occasionally assessed through the lens of viability (i.e., the capacity to survive in the long term) and durability (the capacity to be transferred across generations) (Latruffe *et al.*, 2016).

To understand the potential contribution of agroforestry to a sustainable development in SSA, it is important to recall its connection with climate change. The adverse

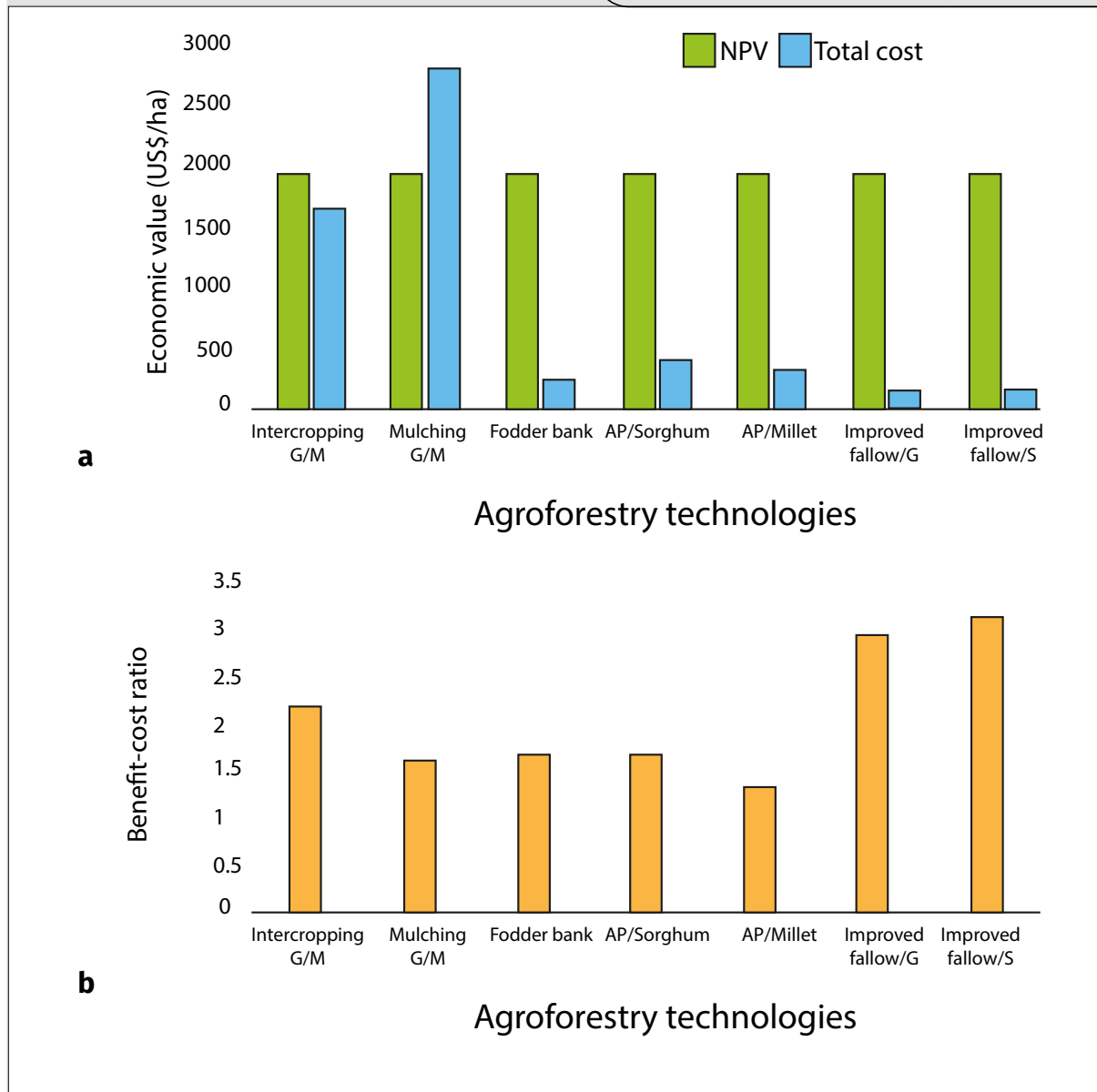


Figure 4. Economic analysis of agroforestry technologies: a) NPV and Total Cost; b) Benefit-Cost Ratio. NPV: Net Present Value; G: *Gliricidia sepium*; S: *Sesbania sesban*; M: Maize; AP: Agroforestry Parkland. Adapted from Ajayi *et al.*, 2005; Fahmi *et al.*, 2018; Rao and Mathuva, 2000; Takimoto *et al.*, 2008.

effects of climate change are the modifications of the physical environment or the biota (as a result of changes in the physical environment), which can have significant harmful effects on the composition, resistance or productivity of natural and managed ecosystems, and on the functioning of social and economic systems, or on human health and well-being (CCNUC, 1992). GIEC (2007) warned that, beyond the climate itself, the consequences of climate change are more complex and include for example: a possible extinction of 20 to 30% of animal and plant species if the temperature rises by more than 2.5 °C, and of more than 40% of species for a warming greater than 4 °C. This would have

important consequences for societies, including conflicts and migrations linked to food crises, health hazards, and environmental hazards. In such a context, to increase agricultural productivity (at least in the short run), farmers might turn either to shifting cultivation or to very intensive agricultural practices, including the application of mineral fertilizers, pesticides, insecticides, and herbicides at higher rates than ever. In the long run, these practices would be detrimental to the soil and crop productivity.

Agroforestry can contribute substantially to a sustainable development in SSA through its capacity to increase yields and food consumption, provide off-farm incomes

from the marketing of agroforestry tree products, reduce communities' dependence on forests, build resilience to climatic variability, protect against environmental hazards (e.g. severe wind, drought, soil erosion) and contribute to climate change mitigation through carbon sequestration (Partey *et al.*, 2017a). Yet, because agroforestry practices were primarily designed for improving soil productivity and soil protection, social and other economic aspects are not always estimated by existing studies in contrast to environmental impacts (e.g. nutrients dynamics, carbon sequestration, etc.). Social impacts of a technology could include for example: education, working conditions (working time and workload, including pain), and quality of life or well-being (Partey *et al.*, 2017a), more valued sometimes by farmers. Even for environmental sustainability, Leakey (2017) criticized the current view of agroforestry as “a set of distinct prescriptions for land use” and recommended instead the integration of various agroforestry practices into a landscape, with increasing scale, so as to maximize benefits from the formation of a complex mosaic of patches that “farmers can manipulate and manage”.

Despite its potentials for a sustainable development, large-scale landscape adoption of agroforestry is relatively low (Partey *et al.*, 2017a) due to several constraints. Firstly, owing to their tree component, agroforestry technologies are generally more negatively affected by land tenure, which is far from secure in many SSA countries (Bambio and Agha, 2018). Secondly, a conflictive environment was developed because a freely graze areas became more privatized. Thirdly, farmers' livelihood priorities are prone to frequent shifts because of the challenges and opportunities brought about constantly by modernization and growing resource needs. Finally, the accessibility (costs, inputs, learnability, etc.) of the technologies can be a major constraint in the adoption and upscaling of agroforestry technologies. All these challenges are exacerbated by the increasing human population in SSA, projected to double by 2050 with subsequent food demand (Tabutin *et al.*, 2020). The increase of population has implications on food security resulting in agricultural expansion with more farmlands. The immediate consequence is usually removal of trees from farmlands along with agriculture intensification and/or agriculture expansion into non-agricultural lands. However, at country level, a large-scale adoption of agroforestry technology and practices can still provide food security and mitigate ecological challenges (Kiyani *et al.* 2017; Jahan *et al.*, 2022). In order for agroforestry to fully contribute in the attainment of Sustainable Development Goals (SDGs), and help in climate change mitigation and adaptation in SSA, future research and development efforts should address the constraints of population growth, new agroforestry technologies development, and their adoption.

Additionally, a clear differentiation in developed technologies across SSA defined by sub-regions with associated socioeconomic emphasis could not be established from this review. It is worth noting that many forms of agroforestry are practiced in SSA, associated with a great variety of climatic conditions and land-use options. These agroforestry technologies are also characterized by a wide vari-

ability in tree species, density, temporal and spatial organization, as well as management practices (Unruh *et al.*, 1993). Analyzing such differences would inevitably require more data that are not readily available across SSA. Besides, similarities exist in the needs, uses and main drivers of change in woodland resources by local populations across SSA (Assèdè *et al.*, 2020). Still, a fine scale analysis of the differences in agroforestry technologies between SSA sub-regions could be addressed in future studies so as to provide more context specific and tailored recommendations for the successful development of agroforestry in SSA.

Conclusions

Technologies developed and used in the agroforestry system in Sub-Saharan Africa (AF-SSA) can be classified into four main groups and seven sub-groups based on factors including the farmers' objective, the biomass introduction technique in the crop field and the tree-crop association types. In parkland agroforests, indigenous fruit trees enhanced both diet, health, with an average household income of US\$ 242 a year in East Africa. Globally, the returns to labour in fertilizer tree technologies outperform (17%) those in natural fallows. The maize yield in tree-based systems is up to double (29 to 113%) in the first three years. A well-managed improved fallow system may contribute between 100 kg N/ha/year and 200 kg N/ha/year. However, the best agroforestry technologies with the highest benefit-cost ratio associated with climate change mitigation effects in Sub-Saharan Africa would be the intercropping and improved fallows systems. Up-front investment and frequent shift in farmers' priorities can be a real barrier to the adoption of certain AF-SSA. Further research should focus on filling the gap in detailed economic social and environmental costs of each technology regarding specific context for effective rational decision-making by farmers in the adoption of AF-SSA.

Acknowledgments

We are grateful to the research unit BioME (Forest Biology and Ecological Modelling, Laboratory of Ecology, Botany and Plant Biology, University of Parakou) for providing logistical facilities.

Funding

This work was funded by the research unit BioME (Forest Biology and Ecological Modelling)/Laboratory of Ecology, Botany and Plant Biology/University of Parakou.

References

- Ajayi O. C., Pace Kwesiga F., Mafongoya P., Franzel S., 2005. Impact of Fertilizer Tree Fallows in Eastern Zambia. Nairobi, Kenya, World Agroforestry Centre (ICRAF), 28 p. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.581.1853&rep=rep1&type=pdf>

- Ajayi O. C., Place F., Akinnifesi F. K., Sileshi G. W., 2011. Agricultural success from Africa: The case of fertilizer tree systems in Southern Africa (Malawi, Tanzania, Mozambique, Zambia and Zimbabwe). *International Journal of Agricultural Sustainability*, 9 (1): 129-136. <https://doi.org/10.3763/ijas.2010.0554>
- Akinnifesi F. K., Chirwa P. W., Ajayi O. C., Sileshi G., Mata-kala P., et al., 2008. Contributions of agroforestry research to livelihood of smallholder farmers in Southern Africa: 1. Taking stock of the adaptation, adoption and impact of fertilizer tree options. *Agricultural Journal*, 3 (1): 58-75. <https://www.medwelljournals.com/abstract/?doi=aj.2008.58.75>
- Amadalo B., Jama B., Niang A., Noordin Q., Nyasimi M., et al., 2003. Improved fallows for western Kenya: an extension guideline. Nairobi, Kenya, World Agroforestry Centre (ICRAF), 56 p. <http://www.knowledgebank.irri.org/cgirc/icraf/Improvedfallow.pdf>
- Assédé E. S. P., Azihou A. F., Geldenhuys C. J., Chirwa P. W., Biao S. S. H., 2020. Sudanian versus Zambebian woodlands of Africa: Composition, ecology, biogeography and use. *Acta Oecologica*, 107: 103599. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1146609X20300916>
- Bambio Y., Agha S. B., 2018. Land tenure security and investment: Does strength of land right really matter in rural Burkina Faso? *World Development*, 111: 130-147. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.06.026>
- Bayala J., Kalinganire A., Sileshi G. W., Tondoh J. E., 2018. Soil organic carbon and nitrogen in agroforestry systems in sub-Saharan Africa: A review. In: Bationo A., Ngaradoum D., Youl S., Lompo F., Fening J. (eds). *Improving the profitability, sustainability and efficiency of nutrients through site specific fertilizer recommendations in West Africa agro-ecosystems*. Springer, Cham, 51-61. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58789-9_4
- Bayala J., Kalinganire A., Tchoundjeu Z., Sinclair F., Garrity D., 2011. Conservation agriculture with trees in the West African Sahel: A review. Nairobi, Kenya, World Agroforestry Centre (ICRAF), Occasional Paper 14.
- Bayala J., Sanou J., Teklehaimanot Z., Kalinganire A., Ouédraogo S. J., 2014. Parklands for buffering climate risk and sustaining agricultural production in the Sahel of West Africa. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 6: 28-34. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.10.004>
- Binam J. N., Place F., Djalal A. A., Kalinganire A., 2017. Effects of local institutions on the adoption of agroforestry innovations: Evidence of farmer managed natural regeneration and its implications for rural livelihoods in the Sahel. *Agricultural and Food Economics*, 5: 2. <https://doi.org/10.1186/s40100-017-0072-2>
- CCNUC, 1992. Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. New York, 31 p. <https://www.recyclage-recuperation.fr/comptes/jcaille/convention-cadre%20climat.pdf>
- Cheesman S., Thierfelder C., Eash N. S., Kassie G. T., Frossard E., 2016. Soil carbon stocks in conservation agriculture systems of Southern Africa. *Soil and Tillage Research*, 156: 99-109. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.09.018>
- Chirwa T. S., Mafongoya P. L., Chintu R., 2003. Mixed planted-fallows using coppicing and non-coppicing tree species for degraded Acrisols in eastern Zambia. *Agroforestry Systems*, 59 (3): 243-251. <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000005225.12629.61>
- Cooper P. J. M., Dimes J., Rao K. P. C., Shapiro B., Shiferaw B., et al., 2008. Coping better with current climatic variability in the rain-fed farming systems of sub-Saharan Africa: An essential first step in adapting to future climate change? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 126 (1-2): 24-35. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.01.007>
- Corbeels M., Cardinael R., Naudin K., Guibert H., Torquebiau E., 2019. The 4 per 1000 goal and soil carbon storage under agroforestry and conservation agriculture systems in sub-Saharan Africa. *Soil and Tillage Research*, 188: 16-26. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.02.015>
- Dallimer M., Stringer L. C., Orchard S. E., Osano P., Njoroge G., et al., 2018. Who uses sustainable land management practices and what are the costs and benefits? Insights from Kenya. *Land Degradation and Development*, 29 (9): 2822-2835. <https://doi.org/10.1002/ldr.3001>
- Degrande A., 2001. Farmer assessment and economic evaluation of shrub fallows in the humid lowlands of Cameroon. *Agroforestry Systems*, 53 (1): 11-19. <https://doi.org/10.1023/A:1012220807248>
- Djalante R., 2018. A systematic literature review of research trends and authorships on natural hazards, disasters, risk reduction and climate change in Indonesia. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 18 (6): 1785-1810. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1785-2018>
- Fahmi M. K. M., Dafa-Alla D.-A. M., Kanninen M., Luukkanen O., 2018. Impact of agroforestry parklands on crop yield and income generation: Case study of rainfed farming in the semi-arid zone of Sudan. *Agroforestry Systems*, 92 (3): 785-800. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-0048-3>
- FAO., 2020. FAO's role in promoting conservation agriculture. Conservation Agriculture. Website, FAO. <http://www.fao.org/ag/ca/>
- GIEC, 2007. Changements climatiques 2007. Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts inter-

- gouvernemental sur l'évolution du climat. PNUE, OMM, 114 p. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_fr.pdf
- Gregory P. J., Ingram J. S., Brklacich M., 2005. Climate change and food security. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360 (1463): 2139-2148. <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1745>
- Haider H., Smale M., Theriault V., 2018. Intensification and intrahousehold decisions: Fertilizer adoption in Burkina Faso. *World Development*, 105: 310-320. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2017.11.012>
- Haile M., 2005. Weather patterns, food security and humanitarian response in sub-Saharan Africa. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360 (1463): 2169-2182. <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1746>
- Halevi G., Moed H., Bar-Ilan J., 2017. Suitability of Google Scholar as a source of scientific information and as a source of data for scientific evaluation – Review of the literature. *Journal of Informetrics*, 11 (3): 823-834. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.06.005>
- Ibrahim A., Abaidoo R. C., Fatondji D., Opoku A., 2015. Integrated use of fertilizer micro-dosing and *Acacia tumida* mulching increases millet yield and water use efficiency in Sahelian semi-arid environment. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 103 (3): 375-388. <https://doi.org/10.1007/s10705-015-9752-z>
- ICRAF, 2017. Corporate Strategy 2017-2026. Transforming lives and landscapes with trees. Nairobi, Kenya, 35 p. https://www.worldagroforestry.org/sites/default/files/users/admin/Strategy%20Report_2017.pdf
- Jahan H., Rahman Md. W., Islam Md. S., Rezwan-Al-Ramim A., Tuhin Md. M.-U.-J., et al., 2022. Adoption of agroforestry practices in Bangladesh as a climate change mitigation option: Investment, drivers, and SWOT analysis perspectives. *Environmental Challenges*, 7: 100509. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667010022000683>
- Kaba J. S., Zerbe S., Zanotelli D., Abunyewa A. A., Tagliavini M., 2017. Uptake of nitrogen by cocoa (*Theobroma cocoa* L.) trees derived from soil decomposition of gliricidia (*Gliricidia sepium* Jacq.) shoots. VIII International Symposium on Mineral Nutrition of Fruit Crops. *Acta Horticulturae*, 1217: 263-270. https://www.actahort.org/books/1217/1217_33.htm
- Kaba J. S., Zerbe S., Agnolucci M., Scandellari F., Abunyewa A. A., et al., 2019. Atmospheric nitrogen fixation by gliricidia trees (*Gliricidia sepium* (Jacq.) Kunth ex Walp.) intercropped with cocoa (*Theobroma cacao* L.). *Plant and Soil*, 435 (1-2): 323-336. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3897-x>
- Kaba J. S., Abunyewa A. A., 2021. New aboveground biomass and nitrogen yield in different ages of gliricidia (*Gliricidia sepium* Jacq.) trees under different pruning intensities in moist semi-deciduous forest zone of Ghana. *Agroforestry Systems*, 95: 835-842. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00414-3>
- Kalaba K. F., Chirwa P., Syampungani S., Ajayi C. O., 2010. Contribution of agroforestry to biodiversity and livelihoods improvement in rural communities of Southern African regions. In: Tschardt T., Leuschner C., Veldkamp E., Faust H., Guhardja E., et al. (eds). *Tropical Rainforests and Agroforests under Global Change*. Environmental Science and Engineering. Berlin, Heidelberg, Springer, 461-476. https://doi.org/10.1007/978-3-642-00493-3_22
- Kang B. T., 1997. Alley cropping – Soil productivity and nutrient recycling. *Forest Ecology and Management*, 91 (1): 75-82. [https://doi.org/10.1016/s0378-1127\(96\)03886-8](https://doi.org/10.1016/s0378-1127(96)03886-8)
- Kant R., Verma J., Thakur K., 2012. Distribution pattern, survival threats and conservation of 'Astavarga' orchids in Himachal Pradesh, Northwest Himalaya. *Plant Archives*, 12 (1): 165-168. https://www.researchgate.net/profile/Ravi-Kant-14/publication/282747692_Distribution_pattern_survival_threats_and_conservation_of_%27astavarga%27_orchids_in_himachal_pradesh_northwest_himalaya/links/561b33fa08ae044eddbb21129/Distribution-pattern-survival-threats-and-conservation-of-%27astavarga%27-orchids-in-himachal-pradesh-northwest-himalaya
- Kimaro A. A., Mpanda M., Rioux J., Aynekulu E., Shaba S., et al., 2016. Is conservation agriculture 'climate-smart' for maize farmers in the highlands of Tanzania? *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 105 (3): 217-228. <https://doi.org/10.1007/s10705-015-9711-8>
- Kimaro A. A., Sererya O. G., Matata P., Uckert G., Hafner J., et al., 2019. Understanding the multidimensionality of climate-smartness: Examples from agroforestry in Tanzania. In: Rosenstock T., Nowak A., Girvetz E. (eds). *The Climate-Smart Agriculture Papers*. Springer, Cham, 153-162. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92798-5_13
- Kiyani P., Andoh J., Lee Y., Lee D. K., 2017. Benefits and challenges of agroforestry adoption: a case of Musebeya sector, Nyamagabe District in southern province of Rwanda. *Forest Science and Technology*, 13 (4): 174-180. <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/21580103.2017.1392367>
- Kohl C., McIntosh E. J., Unger S., Haddaway N. R., Kecke S., et al., 2018. Online tools supporting the conduct and reporting of systematic reviews and systematic maps: A case study on CADIMA and review of existing tools. *Environmental Evidence*, 7 (1): 8. <https://doi.org/10.1186/s13750-018-0115-5>
- Latruffe L., Diazabakana A., Bockstaller C., Desjeux Y., Finn J., et al., 2016. Measurement of sustainability in agriculture: A review of indicators. *Studies in Agricultural Economics*, 118 (3): 123-130. <http://repo.aki.gov.hu/2092/>

- Lawin K. G., Tamini L. D., 2019. Land Tenure Differences and Adoption of Agri-Environmental Practices: Evidence from Benin. *The Journal of Development Studies*, 55 (2): 177-190. <https://doi.org/10.1080/00220388.2018.1443210>
- Leakey R., 2017. Trees: Meeting the social, economic and environmental needs of poor farmers- Scoring sustainable development goals: an update. *Multifunctional Agriculture: Achieving Sustainable Development in Africa*, 417-420. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-805356-0.00040-4>
- Leydesdorff L., de Moya-Anegón F., Guerrero-Bote V. P., 2010. Journal maps on the basis of *Scopus* data: A comparison with the *Journal Citation Reports* of the ISI. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 61 (2): 352-369. <https://doi.org/10.1002/asi.21250>
- Mafongoya P. L., Bationo A., Kihara J., Waswa B. S., 2006. Appropriate technologies to replenish soil fertility in southern Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 76 (2-3): 137-151. <https://doi.org/10.1007/s10705-006-9049-3>
- Masikati P., Manschadi A., Van Rooyen A., Hargreaves J., 2014. Maize-mucuna rotation: An alternative technology to improve water productivity in smallholder farming systems. *Agricultural Systems*, 123: 62-70. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2013.09.003>
- Maithya J. M., Kimenye L. N., Mugivane F. I., Ramisch J. J., 2006. Profitability of agroforestry-based soil fertility management technologies: The case of small holder food production in Western Kenya. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 76 (2-3): 355-367. <https://doi.org/10.1007/s10705-006-9062-6>
- Maranz S., 2009. Tree mortality in the African Sahel indicates an anthropogenic ecosystem displaced by climate change. *Journal of Biogeography*, 36 (6): 1181-1193. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2008.02081.x>
- Materechera S. A., Swanepol H. R., 2013. Integrating the indigenous Kei apple (*Dovyalis caffra*) into a local permaculture vegetable home eco-gardening system among resource-poor households in a semi-arid environment of South Africa. *Acta Horticulturae*, 979: 225-232. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.979.22>
- Mercer D. E., 2004. Adoption of agroforestry innovations in the tropics: a review. *Agroforestry Systems*, 61 (1): 311-328. <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000029007.85754.70>
- Noyons E., 2001. Bibliometric mapping of science in a policy context. *Scientometrics*, 50 (1), 83-98. <https://doi.org/10.1023/a:1005694202977>
- Nyadzi G. I., Otsyina R. M., Banzi F. M., Bakengesa S. S., Gama B. M., et al., 2003. Rotational woodlot technology in north-western Tanzania: Tree species and crop performance. *Agroforestry Systems*, 59 (3): 253-263. <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000005226.62766.05>
- Nyasimi M., Kimeli P., Sayula G., Radeny M., Kinyangi J., Mungai C., 2017. Adoption and dissemination pathways for climate-smart agriculture technologies and practices for climate-resilient livelihoods in Lushoto, Northeast Tanzania. *Climate*, 5 (3): 63. <https://doi.org/10.3390/cli5030063>
- OECD/FAO., 2016. *OECD-FAO Agricultural Outlook 2016-2025 (Chinese version)*. OECD Publishing, 136 p. <https://doi.org/10.1787/19991142>
- Ouédraogo M., Houessionon P., Zougmore R. B., Partey S. T., 2019. Uptake of climate-smart agricultural technologies and practices: Actual and potential adoption rates in the climate-smart village site of Mali. *Sustainability*, 11 (17): 4710. <https://doi.org/10.3390/su11174710>
- Pachauri R. K., Reisinger A., 2007. *IPCC fourth assessment report*. Geneva, Switzerland, IPCC. <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar4/>
- Partey S. T., Sarfo D. A., Frith O., Kwaku M., Thevathasan N. V., 2017a. Potentials of bamboo-based agroforestry for sustainable development in Sub-Saharan Africa: A review. *Agricultural Research*, 6 (1): 22-32. <https://doi.org/10.1007/s40003-017-0244-z>
- Partey S.T., Zougmore R. B., Ouédraogo M., Thevathasan N. V., 2017b. Why promote improved fallows as a climate-smart agroforestry technology in sub-Saharan Africa? *Sustainability*, 9 (11): 1887. <https://doi.org/10.3390/su9111887>
- Phiri E., Verplancke H., Kwesiga F., Mafongoya P., 2003. Water balance and maize yield following improved sesbania fallow in eastern Zambia. *Agroforestry Systems*, 59 (3): 197-205. <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000005220.67024.2c>
- Place F., Roothaert R. L., Maina L., Franzel S., Sinja J., Wanjiku J., 2009. The impact of fodder trees on milk production and income among smallholder dairy farmers in East Africa and the role of research. Nairobi, Kenya, World Agroforestry Centre (ICRAF), Occasional Paper 12, 55 p. <https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/2345/OP16490.pdf?sequence=3>
- Rao M. R., Mathuva M. N., 2000. Legumes for improving maize yields and income in semi-arid Kenya. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 78 (2): 123-137. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00125-5](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00125-5)
- Sawadogo H., 2011. Using soil and water conservation techniques to rehabilitate degraded lands in northwestern Burkina Faso. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 9 (1): 120-128. <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.3763/ijas.2010.0552>
- Schmidt M., Assédé E. S. P., Oebel H., Fahr J., Sinsin B., 2016. Biota of the WAP complex – starting a citizen science project for West Africa's largest complex of protected areas. *Flora et Vegetatio Sudano-Sambesica*, 19: 3-6. <https://d-nb.info/1139892150/34>

Sileshi G. W., Akinnifesi F. K., Mafongoya P. L., Kuntashula E., Ajayi O. C., 2020. Potential of Gliricidia-Based Agroforestry Systems for Resource-Limited Agroecosystems. *In*: Dagar J. C., Gupta S. R., Teketay D. (eds). *Agroforestry for Degraded Landscapes*. Singapore, Springer, 255-282. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4136-0_9

Swamila M., Philip D., Akyoo A. M., Sieber S., Bekunda M., Kimaro A. A., 2020. Gliricidia agroforestry technology adoption potential in selected dryland areas of Dodoma Region, Tanzania. *Agriculture*, 10 (7): 1-17. <https://doi.org/10.3390/agriculture10070306>

Tabutin D., Schoumaker B., Coleman H., 2020. The demography of Sub-Saharan Africa in the 21st century: Transformations since 2000, outlook to 2050. *Population*, 75 (2): 165-286. <https://doi.org/10.3917/popu.2002.0169>

Takimoto A., Nair P. R., Alavalapati J. R., 2008. Socioeconomic potential of carbon sequestration through agroforestry in the West African Sahel. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 13 (7): 745-761. <https://doi.org/10.1007/s11027-007-9140-3>

Tchoundjeu Z., Degrande A., Leakey R. R., Nimino G., Kemajou E., *et al.*, 2010. Impacts of participatory tree domestication on farmer livelihoods in West and Central Africa. *Forests, Trees and Livelihoods*, 19 (3): 217-234. <https://doi.org/10.1080/014728028.2010.9752668>

Thierfelder C., Chivenge P., Mupangwa W., Rosenstock T. S., Lamanna C., *et al.*, 2017. How climate-smart is conservation agriculture (CA)? – Its potential to deliver on adaptation, mitigation and productivity on smallholder farms in southern Africa. *Food Security*, 9 (3): 537-560. <https://doi.org/10.1007/s12571-017-0665-3>

Thorlakson T., Neufeldt H., 2012. Reducing subsistence farmers' vulnerability to climate change: Evaluating the potential contributions of agroforestry in western Kenya. *Agriculture & Food Security*, 1 (1): 15. <https://doi.org/10.1186/2048-7010-1-15>

Toth G. G., Nair P. K., Duffy C. P., Franzel S. C., 2017. Constraints to the adoption of fodder tree technology in Malawi. *Sustainability Science*, 12 (5): 641-656. <https://doi.org/10.1007/s11625-017-0460-2>

Unruh J. D., Houghton R. A., Lefebvre P. A., 1993. Carbon storage in agroforestry: an estimate for sub-Saharan Africa. *Climate Research*, 3 (1): 39-52. <https://www.jstor.org/stable/24863331>

Vaast P., Somarriba E., 2014. Trade-offs between crop intensification and ecosystem services: The role of agroforestry in cocoa cultivation. *Agroforestry Systems*, 88 (6): 947-956. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9762-x>

WOCAT, 2020. What is SLM for WOCAT? Website, World Bank. <https://www.wocat.net/en/slm/sustainable-land-management>

World Bank, 2020. Data catalog – World development indicators. Website, World Bank. <http://data.worldbank.org/data-catalog/world-development-indicators>

World Population Prospects, 2019. Population Division. Website, United Nations. <https://population.un.org/wpp/>

Wraith J., Norman P., Pickering C., 2020. Orchid conservation and research: An analysis of gaps and priorities for globally Red Listed species. *Ambio*, 49 (10): 1601-1611. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01306-7>

Younger P., 2010. Using Google Scholar to conduct a literature search. *Nursing Standard*, 24 (45): 40-46. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20701052/>

Assédé *et al.* – Author's contributions

Contributor role	Contributor names
Conceptualization	E. S. P. Assédé, S. S. H. Biaoou, E. Valdés Velarde
Data Curation	E. S. P. Assédé, S. S. H. Biaoou
Formal Analysis	E. S. P. Assédé, S. S. H. Biaoou
Funding Acquisition	E. S. P. Assédé, S. S. H. Biaoou
Investigation	E. S. P. Assédé, S. S. H. Biaoou
Methodology	E. S. P. Assédé, S. S. H. Biaoou
Project Administration	E. S. P. Assédé, S. S. H. Biaoou
Resources	E. S. P. Assédé, S. S. H. Biaoou
Software	E. S. P. Assédé, S. S. H. Biaoou
Supervision	E. S. P. Assédé, S. S. H. Biaoou
Validation	E. S. P. Assédé, S. S. H. Biaoou
Visualization	E. S. P. Assédé, S. S. H. Biaoou, P. W. Chirwa, J. F. M. F. Tonouéwa, E. Valdés Velarde
Writing – Original Draft Preparation	E. S. P. Assédé, S. S. H. Biaoou, P. W. Chirwa, J. F. M. F. Tonouéwa, E. Valdés Velarde
Writing – Review & Editing	E. S. P. Assédé, S. S. H. Biaoou, P. W. Chirwa, J. F. M. F. Tonouéwa, E. Valdés Velarde

Bois et Forêts des Tropiques - Revue scientifique du Cirad -
© Bois et Forêts des Tropiques © Cirad



Cirad - Campus international de Baillarguet,
34398 Montpellier Cedex 5, France
Contact : bft@cirad.fr - ISSN : L-0006-579X

Agronomic and socio-economic options for rubber intercropping in Sri Lanka: a forward analysis in the Moneragala and Ampara regions

Éric PENOT^{1,2}
Adeline LE GUEN³
Alys CHEVREUX³
Chloé GALLIER³
Hugo ELLIS³
Johanna LAVILLE³
Laura GUILLONNET³
Louise SCHIRMER³
Paul FENECH³
Swanny SCHOEPFER³
Claire DURAND³

¹ CIRAD, UMR Innovation
34398 Montpellier
France

² Innovation, Univ Montpellier
CIRAD, INRAE, Institut Agro
Montpellier
France

³ ISTOM
UR ADI-Suds
4 rue Joseph Lakanal
49000 Angers
France



Photo 1.

Rubber intercropping plantation (single row) with pineapple and banana in Ampara area.
Photo LOAM's officer.

Auteur correspondant /
Corresponding author:

Éric PENOT – eric.penot@cirad.fr

Doi : 10.19182/bft2022.356.a37045 – Droit d'auteur © 2023, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 15 novembre 2022 ;
date d'acceptation : 11 avril 2023 ; date de publication : 1^{er} juin 2023.



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

Citer l'article / To cite the article

Penot E., Le Guen A., Chevreux A., Gallier C., Ellis H., Laville J., Guillonnet L., Schirmer L., Fenech P., Schoepfer S., Durand C., 2023. Agronomic and socio-economic options for rubber intercropping in Sri Lanka: a forward analysis in the Moneragala and Ampara regions. Bois et Forêts des Tropiques, 356: 43-65. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2023.356.a37045>

RÉSUMÉ

Options agronomiques et socio-économiques pour les cultures intercalaires à base d'hévéa au Sri Lanka : une analyse prospective dans les régions de Moneragala et d'Ampara

Le caoutchouc naturel est considéré comme une ressource stratégique pour le développement du Sri Lanka par le ministère des Plantations. En réponse au changement climatique, le pays a adopté une politique axée sur la résilience et le développement durable. C'est dans ce contexte que Ksapa a initié le projet RIVER en 2022, visant à développer un programme de renforcement des capacités agricoles du Sri Lanka. Pour mener à bien ce projet, l'entreprise a mandaté YAPI Expertise pour fournir des modèles de cultures intercalaires agroforestières à base d'hévéa présentant de bonnes performances agronomiques et économiquement intéressantes pour les producteurs en vue de diversifier leurs sources de revenus. Le projet RIVER est mis en œuvre dans deux districts du sud-est du Sri Lanka : Moneragala et Ampara. L'étude a débuté par une analyse de la littérature afin de sélectionner les cultures pouvant être associées à l'hévéa. En parallèle, 80 entretiens, préparés par YAPI Expertise, ont été réalisés sur le terrain par une organisation locale, LOAM. L'objectif de ces entretiens était d'identifier les modèles de cultures associées à l'hévéa déjà mis en œuvre dans les zones d'étude et de comprendre les raisons pour lesquelles les agriculteurs ont adopté ces modèles. Les entretiens ont fait l'objet d'une analyse statistique par analyse à correspondance multiple (ACM) et Chi². En les combinant avec la revue de la littérature, l'étude a permis d'établir cinq modèles (modèle ananas, modèle cacao, modèle banane, modèle fruit de la passion, modèle corossol) pour plusieurs cultures intercalaires pouvant être plantées avec de l'hévéa et ayant un potentiel d'adoption par les agriculteurs locaux. Enfin, des critères de sélection ont été élaborés pour chaque modèle. Ceux-ci présentent à la fois leurs points forts et leurs points faibles, car un modèle performant ne peut reposer sur la seule analyse agronomique et il sera essentiel d'adapter le choix des cultures au marché local et aux besoins des agriculteurs.

Mots-clés : hévéa, cultures intercalaires, analyse multicritère, analyse prospective, Sri Lanka.

ABSTRACT

Agronomic and socio-economic options for rubber intercropping in Sri Lanka: a forward analysis in the Moneragala and Ampara regions

Natural rubber is considered a strategic material for the development of Sri Lanka by the Ministry for Plantations. In response to climate change, the country has adopted a policy focusing on resilience and sustainable development. It is in this context that Ksapa initiated the RIVER project in 2022, aiming to develop a program to strengthen agricultural capacity in Sri Lanka. To carry out this project, the company commissioned YAPI Expertise to provide agroforestry intercropping models based on rubber trees with good agronomic performance and economically of interest to producers to diversify their sources of income. The RIVER project is implemented in two districts in south-eastern Sri Lanka: Moneragala and Ampara. This study began with an analysis of the literature in order to select crops that could be intercropped with rubber. In parallel, 80 interviews, prepared by YAPI Expertise, were conducted in the field by a local organisation, LOAM. The aim of these interviews was to identify rubber intercrop models already implemented in the study areas and to understand the reasons why farmers adopted these models. The interviews were analysed statistically by MCA and Chi². By combining these with the literature review, the study established 5 models (Pineapple model, Cocoa model, Banana model, Passion fruit model, Soursop model) for several intercrops that could be planted with rubber, with potential for adoption by local farmers. Finally, selection criteria were established for each model. Both their strong and weak points are presented, since an effective model cannot rely on agronomic analysis alone and it will be essential to adapt the choice of crops to the local market and to farmers' needs.

Keywords: rubber, intercropping, multi-criteria analysis, prospective analysis, Sri Lanka.

RESUMEN

Opciones agronómicas y socioeconómicas para los cultivos intercalados de caucho en Sri Lanka: un análisis prospectivo en las regiones de Moneragala y Ampara

El Ministerio de Plantaciones considera el caucho natural un material estratégico para el desarrollo de Sri Lanka. En respuesta al cambio climático, el país ha adoptado una política centrada en la resiliencia y el desarrollo sostenible. En este contexto, Ksapa inició el proyecto RIVER en 2022, con el objetivo de desarrollar un programa para reforzar la capacidad agrícola en Sri Lanka. Para llevar a cabo este proyecto, la empresa encargó a YAPI Expertise modelos de cultivos intercalados agroforestales basados en árboles de caucho con buen rendimiento agronómico y económicamente interesantes para que los productores diversifiquen sus fuentes de ingresos. El proyecto RIVER se implantó en dos distritos del sudeste de Sri Lanka: Moneragala y Ampara. Este estudio comenzó con un análisis de la bibliografía para seleccionar los cultivos que podrían intercalarse con el caucho. Paralelamente, una organización local, LOAM, realizó sobre el terreno 80 entrevistas, preparadas por YAPI Expertise. El objetivo de estas entrevistas era identificar los modelos de cultivos intercalados de caucho ya implantados en las zonas de estudio y comprender las razones por las que los agricultores adoptaron estos modelos. Las entrevistas se analizaron estadísticamente mediante análisis de correspondencias múltiples (MCA) y Chi². Combinándolos con la revisión bibliográfica, el estudio estableció cinco modelos (modelo de la piña, modelo del cacao, modelo del plátano, modelo de la fruta de la pasión, modelo de la guanábana) para varios cultivos intercalados que podrían plantarse con caucho, con potencial para ser adoptados por los campesinos locales. Por último, se establecieron criterios de selección para cada modelo. Se presentan tanto sus puntos fuertes como sus puntos débiles, ya que un modelo eficaz no puede basarse únicamente en el análisis agronómico y será esencial adaptar la elección de los cultivos al mercado local y a las necesidades de los agricultores.

Palabras clave: caucho, cultivos intercalados, análisis multicriterio, análisis prospectivo, Sri Lanka.

The rubber sector of Sri Lanka and the RIVER project

The importance of rubber in Sri Lanka

The economy of Sri Lanka is highly dependent on agriculture, both for food and cash crops. In response to the climate change that is particularly affecting Sri Lanka (drought, floods, soil erosion, etc.), the country has adopted a policy focused on enhancing the resilience and sustainability of agricultural productions. Therefore, in the context of the revitalisation of some agricultural export sectors, rubber is at the centre of governmental concerns. Rubber, as a major cash crop of this country, plays an important role in the agricultural sector. In the recent years, the government of Sri Lanka has strongly encouraged the development of the rubber sector, with the help of scientific institutions and private companies such as “Camso Loadstar”.

In 2017, the Sri Lankan government implemented the rubber master plan to promote this sector on a national level. The program consists of identifying the administrative and operational problems of the existing sector. The objective is to establish a sustainable industry in order to attract foreign investors. The benefits would accrue to the stakeholders in the rubber sector. The first results of the project are expected in 2025. In 2020, the export values of coffee, tea and spices accounted 15.6%, i.e., US\$ 1,6 billion, of the country's total export value. Rubber by itself accounted for 8.1% (US\$ 870 million) (Workman, 2022). The rubber industry accounts for around 10% of agricultural exports. In 2020, rubber represented 136 300 ha in Sri Lanka, which corresponds to 2% of the total land area (Sankalpa *et al.*, 2020) with an average yield of 642 kg/ha/year (Rubber Research Institute of Sri Lanka, 2020). 81% of rubber production comes from smallholders (Dissanayake *et al.*, 2016), and more than 80,000 of small-scale producers are involved in the rubber cultivation.

At the village scale, smallholders are organised in “societies” which can be compared to the functioning of agricultural cooperatives with the following features: i) Distribution of subsidies; ii) Developing marketing facilities; iii) Proposing training programs; and iv) Supporting processing facilities. Depending on the local conditions and territorial situations, these *societies* are more or less active in the villages. In Moneragala district, 43 *societies* out of 85 are considered as active. Altogether, 65% of the smallholders are members of a *society* in Moneragala (Gunarathne *et al.*, 2020).

The institutional context of the study

Ksapa is a French consulting company created in 2019. It provides services and assistance in the agricultural sector in order to promote a performant economic model of development. In collaboration with the government of Sri Lanka and with the objective to design solutions to reinforce the resilience for agricultural rubber systems, Ksapa initiated in 2022 the RIVER project based on a training program to

strengthen agricultural capacity in South-East Sri Lanka with focus on rubber farming systems. The RIVER Project is funded by the French Ministry of Economy, Finance and Recovery and the Michelin Group. The main implementing organisations are Camso Loadstar (Michelin subsidiary in Sri Lanka) and LOAM (Lanka Organic Agriculture Movement), a local NGO promoting organic farming in Sri Lanka. Six thousand rubber smallholders are targeted by the RIVER project.

The present study has been commissioned by Ksapa for the initial diagnosis phase of the RIVER project. Intercropping and agroforestry being considered as levers for more resilient agricultural systems, the objective of this study is to identify potential intercrops in rubber cultivation systems, during the immature and mature phases of the tree, in the selected study areas (Moneragala and Ampara districts). Intercrops should allow farmers to have a higher income than in a monoculture system, allowing them to better cope with the very high volatility of natural rubber prices (Stroesser *et al.*, 2018) while having more environmentally friendly and productive production system. The final objective is to explore and provide “models of cultivation” based on intercropping during immature so far (and at least in the first place) that are agronomically “performant” and economically interesting for local farmers. These agroforestry systems should be adapted to local soils and climatic conditions as well as supported by local markets. This prospective study is partially based on some agroforestry practices used by local farmers. The prospective aspect concerns the search for best-bet potential agroforestry alternatives adapted to local conditions in an exploratory process.

The research question

Given the favourable context of the rubber sector (supported by the rubber master plan previously mentioned), the national competent authorities of Sri Lanka identified new rubber growing areas. The two districts of Moneragala and Ampara appear as particularly interesting regarding their potential for rubber cultivation. This study aims to define several performant intercrops models in order to complete a training program that will be proposed to farmers of these two districts. The performant models consider the agronomic aspect and the socio-economic dimension.

More specifically, the aim of this paper is to establish a more agronomically, economically and socially sustainable cultivation system in order to raise incomes during rubber immature period in the short run. It has been shown in other countries that the implementation of intercropping is economically and agronomically interesting in rubber plots. Historically, many farmers in almost all rubber producing countries have adopted intercrops during immature period to raise an income before that of rubber (Langenberger *et al.*, 2016). In Indonesia and Thailand, inter-

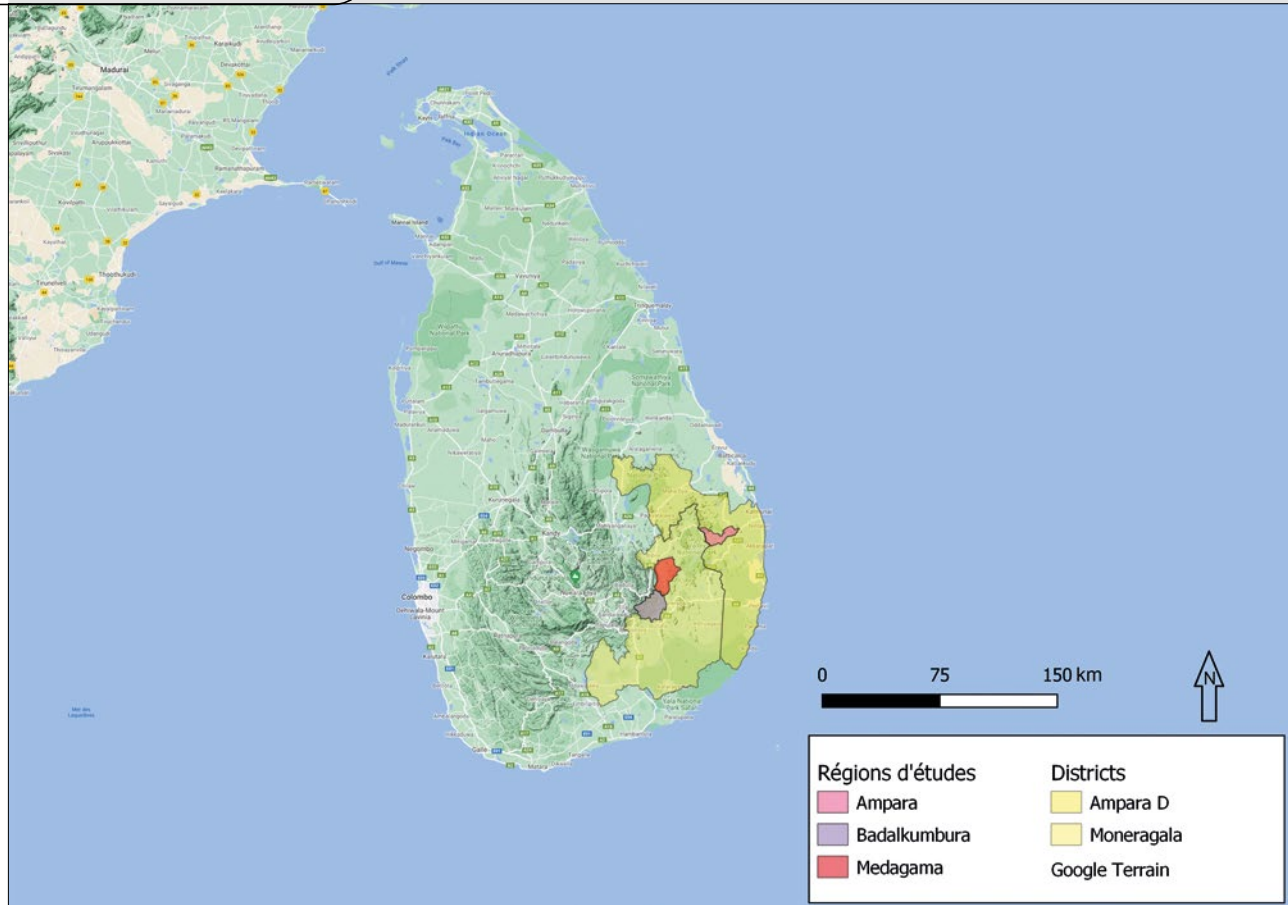


Figure 1.
Study area of YAPI Expertise's study areas.

cropping in mature period is also well developed (up to 15-20% of the total rubber area in Southern Thailand and Kalimantan) (Penot, 2001, 2004a, 2004b; Penot *et al.*, 2009; Jongrungrot *et al.*, 2014; Snoeck *et al.*, 2013; Somboonsuke *et al.*, 2011), Agroforestry practices display globally an annual income increase from 20 to 40% in Southern Thailand (Strosser *et al.*, 2018).

One of the hindrances to the development of intercropping is the difficulty of understanding potential interactions and implementing it by the rubber farmers. The survey conducted in the two selected districts helps to understand the limits of the implementation of these systems, and how to facilitate the development of these agroforestry practices.

The study areas

The study is conducted in two districts in the southeast of Sri Lanka (figure 1): Moneragala and Ampara. These two districts have been identified collectively with all partners of the RIVER project. This area is not an historical rubber cultivation zone. Indeed, they are: Kegalle, Rathnapura, Kaltura and Colombo. However, the government has decided to develop new rubber plantation areas in zone with a rela-

tive dry season due to the lack of available cultivable land in the historical rubber cultivation areas.

For this reason, the RIVER project decided to focus on these two districts nowadays considered as very promising areas for rubber cultivation in Sri Lanka.

Moneragala

Moneragala is located in the province of Uva (5,639 km²) and one of the least densely populated regions in the country with almost 90 inhabitants/km². Three different types of land can be identified within the district: i) The mountainous areas, rather located in the east of the district with altitudes between 550 m and 1,400 m above sea level; ii) The hilly areas, transition zones between the mountainous parts of the centre and the wide plains of the east. Their altitude ranges from 160 m to 550 m; and iii) The lowland areas are the most widespread zones in the district since they represent almost 75% of its area, generally below 160 m in altitude. 84% of the annual rainfall is concentrated in the seven months of the rainy seasons (Yasaratne *et al.*, 1992) with a relative 5 months dry season creating a situation of marginality for rubber.

Rice (*Oriza sativa*) is the most important crop of the district, covering almost 5.4% of the area, i.e., 30,450 ha. The

second most common crop is sugar cane (*Saccharum officinarum*). Food crops are many and varied, including several types of fruit and vegetables, mostly grown in home gardens. Moneragala is the largest producer of Banana (*Musa spp*) with nearly 8,000 ha. In addition, 2,000 ha are dedicated to mango cultivation (*Mandifera indica*) (Ministry of Agriculture of Sri Lanka, 2016). Papaya (*Carica papaya*), rambutan (*Nephelium lappaceum*), orange (*Citrus spp.*), passion fruit (*Passiflora edulis*) and pineapple (*Ananas comosus*) are also produced in the district. Nowadays, Moneragala is the 5th most productive rubber region of Sri Lanka preceded by the 4 historical regions where rubber is cultivated. In the Moneragala district, 5,876 ha of rubber are cultivated by 7,800 producers in 2010 (last census), of which 7,250 had less than 2 ha, 4,808 less than 0.8 ha (Sri Lanka Export Development Board, 2022).

Ampara

Ampara is located at the east of Moneragala, with an area of 4,445 km². The population density is much higher than Moneragala and is 145 inhabitants/km² (Ampara District Secretariat, 2020). Ampara is the largest producer of rice in the country, estimated at over 25% of national production. There are also other widely grown crops such as corn, coconuts, cashew nuts and a wide variety of fruit trees (Ministry of Agriculture of Sri Lanka, 2019). Ampara is a recent rubber extension area, even more than Moneragala since almost no documentation do exist on the actual rubber cultivation practices in Ampara. In 2014 (last record), Ampara had 335 rubber smallholders, compared to 80,500 nationwide (Sri Lanka Export Development Board, 2022).

Methodology

Overall method of the study

The overall study consists in a multi-criteria approach to assess the agronomical and socio-economic performances and acceptability of intercropping in rubber farming systems. Based on these results, the RIVER project will assess the interest of supporting the introduction of intercropping practices in the two districts of Monaragala and Ampara. It is an agronomical study combined with a socio-economic approach of intercropping. The main objective is to compare the different intercrops and thus determine the most performant ones from an agronomic and socio-economic point of view.

The method is divided into three steps:

- i) Literature review on intercropping systems with rubber. The literature will be analysed by multi-criteria analysis in order to produce a ranking of intercrop systems regarding their performance.
- ii) Field survey of farmers in Sri Lanka. It consists in an assessment of existing intercrops in the study areas and an evaluation of the position of producers regarding these existing intercrops through adoption criteria.
- iii) Focus groups: with all stakeholders of the rubber sector to discuss the results and foster dialogue on intercropping and sustainability of rubber cultivation.

The results of the three steps will be combined to determine the performance of intercropping models and identify the most performant models to be implemented in the study areas for the continuation of the RIVER project.

The study of potential associated plants to rubber

According to Rodrigo *et al.* (2004), rubber trees can be arranged in several ways on the plot depending on the type of cropping system, but the main special arrangements are: i) Single spacing, i.e., a single row of rubber trees with an inter-row distance of 6 to 8 m and ii) Double spacing, which consists of planting rubber trees in double rows with a spacing of 14.1 m between each double row. According to the literature review, double spacing would allow the inclusion of more intercropping. As stated by LOAM, single spacing is more frequent in Sri Lanka. In order to propose a model that is as faithful as possible to the realities of the ground, YAPI Expertise decided to base its study only on single spacing.

Literature review and intercrops ranking

This study began by completing the initial list of intercrops that have been made for the first deliverable. The literature review first aimed at establishing an extensive list of potential inter-crop for rubber cultivation systems. The list is mostly based on the one presented in the article "Rubber intercropping: a viable concept for the 21st century?" (Langenberger *et al.*, 2016). Thus, 80 crops have been identified. Only crops that are present in Sri Lanka have been retained, i.e., 70 crops. The literature review continued to address several criteria for each of the 70 crops selected. The following data are given for each crop in the list:

- Classification of the type of crop (fruit tree, medicinal plants, export commodity, etc.).
- Preferences of the crop regarding climate conditions.
- Preferences of the crop regarding soil conditions.
- Life cycle duration (annual, multiannual or perennial).
- Phase of the rubber tree in which the crop can be planted (mature and/or immature). It is based on the production period of the intercrop and its tolerance to shading.

The intercrops have been sorted in a second table according to the development phase of the rubber tree.

The potential crop candidates have been selected based on the following criteria:

- The "climate" category compares the needs and resistance of each crop studied with the climatic conditions (rainfall, temperature, etc.) of the study areas.
- The "soil" category, the criteria are based on the types of soil present in the two study areas.
- The criteria of the "crop" category based on the exchanges between the intercrop and the rubber tree, in particular the water competition, the light competition.

A colour scale has been used to determine whether the needs of the crop are compatible with the criteria. Green is "compatible", Orange is "moderately compatible"; and Red is "not compatible". As not all criteria have the same impact on the selection of the crop, degrees of impact have been established from 1 to 4. The aim is to

assign a mark to each crop in order to be able to rank them. To do this, a numerical scoring system was set up. A pre-selection was carried out on the basis of the most important criteria, i.e., having a degree of impact of 4. As the pre-selection was not sufficient to reduce the number of crops on the list, a second and final selection was undertaken. This last selection was based on all the criteria, unlike the

pre-selection, which was based only on the criteria having a degree of impact of 4.

Finally, from these two tables, the colour scale and the numerical scoring system, a final score could be assigned for each crop. Two ranking tables were constructed: one for the immature phase and one for the mature phase.

Table I.
Social performance criteria.

Criteria	Unity	Definition
Rubber yield (RubbTYield)	kg/year	The intercropping model studied should not have a negative impact on natural rubber yields.
Ecological performance (EcoLperf)	kg	One of the objectives of intercropping systems is to limit the addition of phytosanitary inputs within the system, notably through the various ecosystem services (EcoSySryc). Models where phytosanitary inputs have disappeared are therefore more performant.
Ecosystemic services (EcoSySrvc)		One of the most interesting aspects of setting up an intercropping plot is the ecosystem services the different species within the system can provide to each other (CIRAD, 2019). A performant intercropping system is therefore logically one in which each species maximises the benefits of the ecosystem services provided by the various crops.

Table II.
Economic performance criteria.

Criteria	Unity	Definition
Income from intercropping (IncoInterCrop)	LKR	The crop association must be a good source of income or food resources. As studied in Thailand by Stroesser L., income from intercrop production can make smallholder rubber farmers more resilient to the volatility of natural rubber prices. Nonetheless, the work mobilised for the intercrops should not have a negative impact.
Production cost of the plot (ProdCost)	LKR	Smallholders, especially in Moneragala district, have limited income (Sankalpa <i>et al.</i> , 2020). Introduction of inter-row cultivation should not increase significantly production costs.
Initial investment (IniInvst)	LKR	Smallholders in the Moneragala district have a very low monthly income and low capacity to invest. The initial investment in establishing a large intercrop is a major constraint.

Table III.
Adoption criteria.

Criteria	Unity	Definition
Labour required (InterCropLab)	Day/month or Hour/day or Unity of Human work	The availability of labour is one of the potential limiting factors for the implementation of such complex agronomic models. Moreover, as detailed by Rodrigo <i>et al.</i> (2011) and Karunaratne <i>et al.</i> (2011), the increase of the amount of labour force may be one of the major reasons for not implementing these practices.
Geographical access to the market (GeoMrkt)	km	Distance.

Field survey

The second step of the methodology is a socio-economic survey of the existing intercropping with rubber farming systems in Moneragala and Ampara. The objective is to analyse the actual practices of intercropping in the areas and collect qualitative data on the positions of farmers and the acceptability of increasing the intercropping in rubber systems. The method used is based on the publication about the evaluation of the overall performance of a farm (Zahm *et al.*, 2013) to determine agronomic, economic and adoption criteria. The objective of the field survey was to collect data regarding two categories of criteria: performance criteria and adoption criteria for intercropping.

Performance criteria

Most of the criteria defined refer to the scale of analysis of the cropping system, as the objective is to study the performance of intercrops models: Economic performance; Social performance; Agronomic performance (Zahm *et al.*, 2013). A model is called performant when it has the capacity to respond to the constraints of the context (both agronomic and socio-economic). The “agronomic” category is assessed by the first step of the methodology (table I). The tables II and III present all the “social” and “economic” performances criteria. It should be noted that each criterion was corrected and adjusted in collaboration with the Sri Lankan partners and CIRAD.

Adoption criteria

The intercropping models that will be designed following the analysis of the results can be considered agricultural innovations. An agricultural innovation is defined as a new idea, practice or technique that can sustainably increase agricultural productivity and income. Any innovation proposed to a population must be adopted by it. Adoption is defined as the decision to apply the innovation and to continue using it (Kam, 2013). Table VII presents the 2 criteria selected to assess the acceptability of an innovation consisting in the introduction of more intercropping in the actual rubber systems.

A survey with semi-structured interviews with farmers

The interview guides were constructed from the data needed to fulfill the performance and adoption criteria on intercropping. The questionnaire was tested during 5 interviews and then adapted to clarify misunderstandings and to prioritise the information requested

by the multi-criteria study. The survey has been conducted by the Sri Lankan team of the RIVER project (mainly staff from LOAM), since the country was not accessible anymore due to a national crisis in Sri Lanka in July and August 2022. Sampling was based on LOAM's deployment capacity, considering the local situation of Sri Lanka during the national crisis. In total, 80 interviews were carried out, including 61 in Moneragala and 19 in Ampara (figure 2).

Farmers were interviewed as required by Sri Lankan regulations. Farmers were contacted according to their location and their motivation to become involved in a project like the RIVER project. These same farmers are currently still in contact with LOAM and are taking part in the pilot phase of the agricultural training provided by Ksapa.

As regards the people invited to take part in the focus group discussion, each person was informed that their participation would be considered in the diagnosis of the RIVER project. Each stakeholder has been made aware that their response will add value to the study and will therefore be analyzed.

Data analysis with MCA

The data are both quantitative or qualitative variables. The variables and their modalities are presented and organized into categories. The Multiple Correspondence Analysis (MCA) method is chosen by YAPI Expertise because it allows the analysis of the association between several qualitative variables. It should be noted that the answers

Table IV.
Economic performance variables.

Economic performance		
Variable category	Qualitative variable	Modalities
Crop	Cocoa	COCOA; NO.COCOA ; NG ¹
	Banana	BANANA; NO.BANANA; NG
	Pineapple	PINEAPPLE; NO.PINEAPPLE; NG
	Corn	CORN; NO.CORN; NG
	Cowpea	COWPEA; NO.COWPEA; NG
	Mungbean	MUNGBEAN; NO.MUNGBEAN; NG
	Pepper	PEPPER; NO.PEPPER; NG
	Sugarcane	SUGARCANE; NO.SUGARCANE; NG
Crop yield	Yield of each intercrop	high; medium; low; NG
Seed cost	Seed cost of each intercrop	high; medium; low; NG
Initial investment	Initial investment of each intercrop	high; medium; low; NG
Rubber yield	Rubber yield	high; medium; low; NG
Cost input ²	Cost input	high; medium; low; NG
People household	People household	high; medium; low; NG
Extra people ³	Extra people	high; medium; low; NG
Salary	Salary	high; medium; low; NG
Use of intercrop	Use of intercrop	AUTOCONSUMPTION; SELL; NG

¹ NG: when the data is not given. ² Cost input: sum of fertiliser, herbicide and pesticide costs. ³ Extra people: labour force employed by the household.

Table V.
Socio-agronomic performance variables.

Socio-agronomic performance		
Variable category	Qualitative variable	Modalities
Major issues	Pest attack	PEST.ATTACK; NO.PEST.ATTACK; NG
	Lack of water	LACK.OF.WATER; NO.LACK.WATER; NG
	Lack of input	LACK.OF.WATER; NO.LACK.WATER; NG
	Wild animal attack	WILD.ANIMAL.ATTACK; NO.WILD.ANIMAL.ATTACK; NG
	Lack of labour	LACK.OF.LABOUR; NO.LACK.OF.LABOUR; NG
	Erosion	EROSION; NO.EROSION; NG
	Marketing problems	MARKETING.PROBLEMS; NO.MARKETING.PROBLEM; NG
	High cost of irrigation	HIGH.COST.IRRIGATION; NO.HIGH.COST.IRRIGATION; NG
	Drought	DROUGHT; NO.DROUGHT; NG
	Fuel crisis	FUEL.CRISIS; NO.FUEL.CRISIS; NG
	Expensive input	EXPENSIVE.INPUT; NO.EXPENSIVE.INPUT; NG
	High labour cost	HIGH.LABOUR.COST; NO.HIGH.LABOUR.COST; NG
	Lack of harvest	LACK.HARVEST; NO.LACK.HARVEST; NG
	Transportation problems	TRANSPORTATION.PROBLEMS; NO.TRANSPORTATION.PROBLEMS; NG
	Poor soil condition	POOR.SOIL.CONDITION; NO.POOR.CONDITION; NG
	Lack of technical knowledge	LACK OF TECHNICAL KNOWLEDGE; NO.LACK OF TECHNICAL KNOWLEDGE; NG
	Processing issues	PROCESSING.ISSUES; NO.PROCESSING.ISSUES; NG

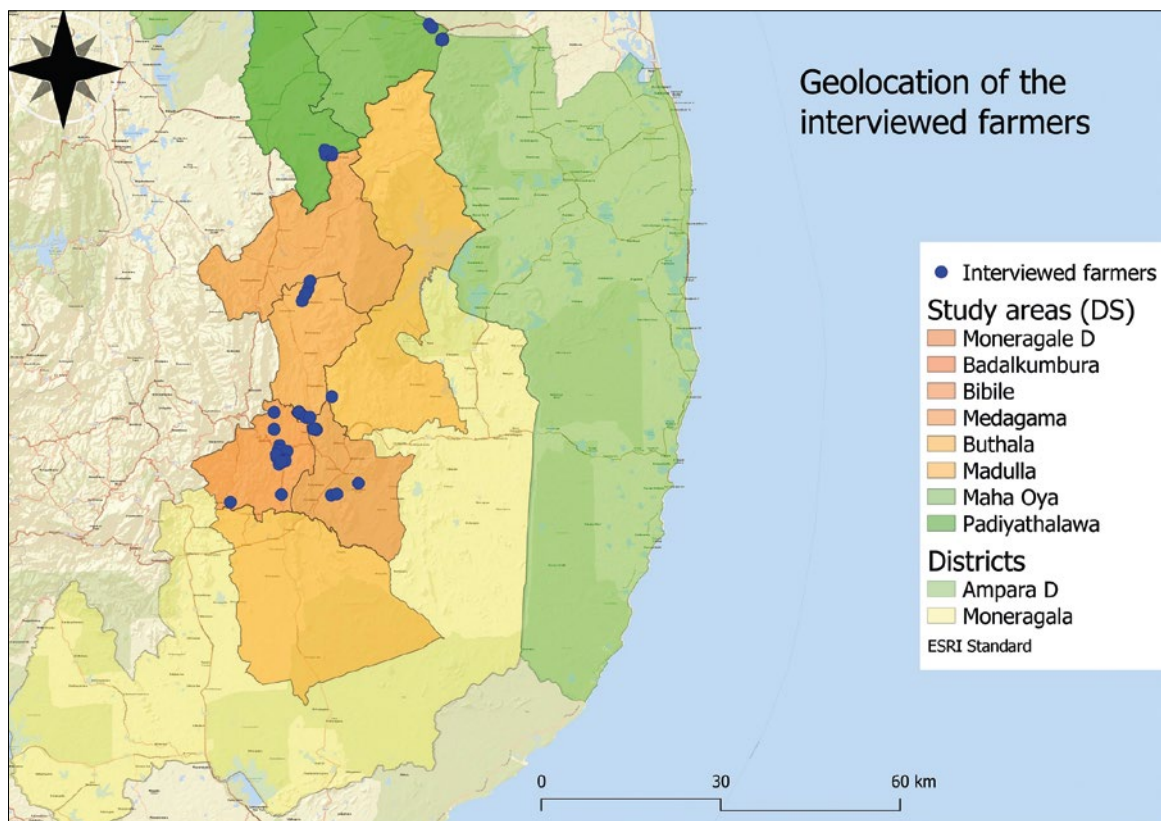


Figure 2.
Geolocation of the surveyed farmers.

related to economic performance were obtained through precise and closed questions. Whereas those related to socio-agronomic performance or adoption criteria were asked through open questions. They also complement the performance criteria (tables IV, V and VI). For the implementation of the MCA, all modalities, even quantitative, were discretized. Variables were also selected according to their relevance or according to the quality of the results obtained. Indeed, some questions were almost never answered or could not be used. For instance, a few intercrops were only grown by a very small number of farmers and the variable “Use of intercrop” did not obtain a good quality of responses. A range of values was defined using Box Plots (quartile, median): i) “Low” corresponds to values below the first quartile; ii) “Medium” corresponds to values between the first and third quartiles; and iii) “High” corresponds to values above the third quartile. The correspondences identified through the graphical projection of the ACM results were highlighted through a clustering performed using a Hierarchical Clustering on Principal Components (HCPC). Finally, Chi² tests were conducted to significantly associate each response to the variables with an intercrop or group of intercrops. For economic performance, the interdependence between all the variables was verified through this test (see figure 4).

Focus groups with stakeholders of the rubber sector

The focus groups are intended to discuss the processed data from smallholders and stimulates dialogue among the stakeholders of the rubber sector. It also seemed interesting for the study to obtain a global overview of the political, social, and economic dimensions of the rubber sector and its main intercrop. An open-ended interview guide was drafted for LOAM's interviewers, along with a facilitation note. The focus groups were set up in such a way that experts from research, the field actors and the economic environment met to discuss rubber cultivation in intercropping systems. The objective was the validation of results and more information on farmers strategies concerning intercropping. Based on LOAM's capacity, it was agreed to organise 3 focus group sessions. The three focus groups are composed of several key persons which are all linked with rubber cultivation but with different objectives and divergent visions. The focus groups have reunited, respectively, 8, 9 and 11 people in the Districts of Moneragala, Badalkumbura and Bibile. The composition of the different focus groups is relatively similar:

- One or two farmers, who are the first to be impacted by the establishment of intercropping plots.

Table VI.
Adoption variables.

Adoption criteria		
Variable category	Qualitative variable	Modalities
Reasons ¹	Moisture	MOISTURE.CONSERVATION; NO.MOISTURE.CONSERVATION
	Soil erosion	SOIL.EROSION; NO.SOIL.EROSION
	Extra income	EXTRA.INCOME; NO.EXTRA.INCOME
	Society	SOCIETY.CHOICE; NO.SOCIETY.CHOICE
	Less maintenance cost for rubber	LESS.MAINTENANCE.COST.FOR.RUBBER; NO.LESS.MAINTENANCE.COST.FOR.RUBBER
	Availability of planting material	AVAILABILITY.OF.PLANTING.MATERIAL; NO.AVAILABILITY.OF.PLANTING.MATERIAL
	Land preparation	LAND.PREPARATION; NO.LAND.PREPARATION
	Adapted to climate	ADAPTED.TO.CLIMATE; NO.ADAPTED TO.CLIMATE
	Easy maintenance	EASY.MAINTENANCE; NO.EASY.MAINTENANCE
	Support rubber growth	SUPPORT.RUBBER.GROWTH; NO.SUPPORT.RUBBER.GROWTH
	Use available space ²	USE.AVAILABLE.SPACE; NO.USE.AVAILABLE.SPACE
	Soil nutrition	SOIL.NUTRITION; NO.SOIL.NUTRITION
Shade	SHADE; NO.SHADE	

¹ Reasons why farmers choose intercropping; ² The farmer wanted to use the space left in the rubber plot.

- A farmer inspector and a representative of the *societies* (Thurusaviya). These two actors have an overall vision of the rubber industry in the region and are aware of the main issues the rubber farmers face.
- The District Director of Agriculture provides a government perspective on rubber cultivation in the region.
- Entities linked to research, such as the Rubber Research Institute and the Rubber Development Department, were present only in the first focus group in Moneragala. The presence of these actors provides a scientific opinion on the development of intercrops among smallholders.
- Private sector (mainly buyers): Camso Loadstar's participated to all the focus groups. Indeed, as the main actor of the project and the main buyer of rubber from the smallholders, their point of view is important. The main buyers of intercrop products are also represented.
- The Export Agriculture Department, which is linked to the marketing of cash crop products (cocoa, cinnamon, etc.). Both will provide an opinion on the economic aspect of the establishment of a particular crop and the economic issues that may be linked to it.

Table VII.

Results of the intercrops compatible with the mature phase. Right column: green is highly suitable, red is not suitable; yellow in between. Left column: Purple: annual plants; Cyan: multiannual plants or semi-perennial plants; Yellow: perennial plants.

Mature phase: results	
Crops	Mark
<i>Azadirachta indica</i> - neem	49
<i>Centrosema pubescens</i> - butterfly pea	47
<i>Pterocarpus</i> sp. - padouk, narra	47
<i>Arachis pintoï</i>	46
<i>Aquilaria</i> sp. - eaglewood	45
<i>Fagraea fragrans</i> - iron wood	45
<i>Cocos nucifera</i> - coconut	44.5
<i>Gmelina arborea</i> - gmelina	43
<i>Pueraria phaseoloides</i> - tropical kudzu	43
<i>Ammonum villosum</i> - medicinal cardamom	42
<i>Nephelium lappaceum</i> L. - rambutan	42
<i>Piper nigrum</i> L. - pepper	41.5
<i>Mangifera indica</i> L. - mango	41.5
<i>Tectona grandis</i> L. - teak	41.5
<i>Calopogonium caeruleum</i>	41
<i>Parkia speciosa</i> - stink bean	41
<i>Stylosanthes guianensis</i> - common stylo	41
<i>Paraserianthes falcataria</i> (L.) - white albizia	41
<i>Passiflora edulis</i> Silms - passion fruit	41
<i>Artocarpus attilis</i> - breadfruit	40.5
<i>Cinamomum verum</i> - cinnamon	40.5
<i>Shorea macrophylla</i> - light red meranti	40.5
<i>Garcinia mangostana</i> L. - mangosteen	40
<i>Morinda officinalis</i> - morinda	40
<i>Annona reticulata</i> L. - custard-apple	39.5
<i>Artocarpus heterophyllus</i> - jackfruit	39
<i>Salacca zalacca</i> - snake fruit	39
<i>Vanilla fragrans</i> - vanilla	38.5
<i>Anacardium occidentale</i> L. - cashew nut	38
<i>Areca catechu</i> - betel nut tree	37.5
<i>Citrus x paradisi</i> - grapefruit	37
<i>Citrus reticulata</i> - tangerine	37
<i>Citrus x sinensis</i> - orange	37
<i>Durio zibethinus</i> - durian	36
<i>Carica papaya</i> L. - papaya	35
<i>Citrus aurantiifolia</i> - lime	35
<i>Macadamia</i> sp. - macadamia nut	35

Table VIII.

Results of the intercrops compatible with the immature phase. Right column: green is highly suitable, red is not suitable, yellow in between. Left column: Purple: annual plants; Cyan: multiannual plants or semi-perennial plants; Yellow: perennial plants.

Immature phase: results	
Crops	Mark
<i>Centrosema pubescens</i> - butterfly pea	47
<i>Arachis pintoï</i>	46
<i>Mucuna bracteata</i>	45
<i>Mucuna cochinchinensis</i>	45
<i>Manihot esculenta</i> - cassava (culture < 12 months)	44.5
<i>Vigna unguiculata</i> - cow pea	44
<i>Flemingia macrophylla</i>	43
<i>Pueraria phaseoloides</i> - tropical kudzu	43
<i>Noicotiana</i> spp. - tobacco	42.5
<i>Alpinia oxiphylla</i> - black cardamom	42
<i>Arachis hypogaea</i> L. - groundnut	42
<i>Cajanus cajan</i> (L.) - pigeon pea	42
<i>Ananas comosus</i> (L.) - pineapple	42
<i>Ammonum villosum</i> - medicinal cardamom	42
<i>Capsicum annuum</i> L. - chili pepper	41.5
<i>Cymbopogon citratus</i> (DC.) - lemon grass	41.5
<i>Calopogonium caeruleum</i>	41
<i>Stylosanthes guianensis</i> - common stylo	41
<i>Citrullus colocynthis</i> - bitter cucumber	40.5
<i>Sorghum bicolor</i> (L.) - sorghum	40.5
<i>Musa acuminata</i> - banana	40
<i>Crotalaria</i> spp. - rattlepods	40
<i>Glycine max</i> (L.) - soybean	40
<i>Morinda officinalis</i> - morinda	40
<i>Theobroma cacao</i> L. - cocoa	40
<i>Ipomoea batatas</i> L. - sweet potato	39.5
<i>Psophocarpus tetragonolobus</i> (L.)	39.5
<i>Luffa acutangulas</i> - angled Loofah	39.5
<i>Vigna radiata</i> (L.) - mung bean	39
<i>Pogostemon cablin</i> (Blanco) - patchouly	39
<i>Curcuma domestica</i> - turmeric	37.5
<i>Coffea canephora</i> - coffea robusta	37.5
<i>Citrullus lanatus</i> - watermelon	34
<i>Saccharum officinarum</i> L. - sugar cane	33
<i>Oryza sativa</i> L. - upland rice	32

Results

Ranking of intercrops

The literature review of the selected crops in Sri Lanka and in other countries led to the creation of a rating of rubber tree, through a scoring system according to the mature and immature phases. A solid agronomic analysis led to such scoring considering as well potential adoption by local people. The maximum score that can be assigned to the crops is 49. As shown in the tables below, the selected crops were classified according to the methodology presented previously. The gradient is represented by colours from green (the best) to red (the worst or less adapted). The higher score corresponds to the crops which fits the most with the soil and climate conditions of the study areas and can be planted with rubber tree. Conversely, a low score is represented by a red colour and indicates that the crop does not correspond to the soil and climate conditions of the study areas and is not recommended as an intercrop with rubber (tables VII and VIII).

Results of the field survey

Figure 3 highlights the difference in intercrops cultivated between the two study areas. Intercrops in Ampara are more diversified than in Moneragala. The most common intercrops grown in Ampara are cover and food crops with cowpea (21.2%), mungbean (13.5%) and corn (13.5%) while in Moneragala there is a large majority of cash crops with cocoa (42.6%), banana (21.3%) and pepper (16.7%).

The projection of the points on the two factorial axes shows that some modalities are gathered, and form clusters

highlighted by the red circles. Note that the modalities followed by the letter NG correspond to answers not given by the surveyed for this variable. The size of the dots depends on their contribution to the factorial axis. The hierarchy presented in figure 5 just below highlights these clusters more clearly and precisely.

These results associate the establishment of intercrops with specific economic characteristics: i) sugar cane and pineapple require much more field work than other crops; ii) pepper requires moderately more field work than other crops; iii) cowpea, corn and mungbean lower input costs; iv) cocoa is highly related to wild animal attacks (giant squirrel and monkey); v) banana and pepper imply high workforce costs and resist very badly to drought periods; vi) pepper cultivation is strongly linked to pest attacks; and vii) there is a global market issue for each intercrop.

The projection of the MCA for the adoption criteria forms very few clusters. It should be noted that the modality "other" refers to intercrops that were identified very few times and are therefore not significant to analyse. On the other hand, the clusters are more visible on the dendrogram as follows: i) farmers choose sugarcane as an intercrop because it is adapted to the pedo-climatic conditions of the study areas; ii) farmers choose pineapple as an intercrop because it would help to prevent soil erosion and would also reduce the cost of the rubber plot's maintenance; and iii) cowpea, mungbean and corn provide soil nutrition and support rubber tree's growth. It is the main reasons why farmers use them as intercrops.

Finally, the histogram highlights that *societies* encourage producers to grow cash crops for the market. It shows that the main reasons why farmers decided to add intercrops to their rubber plots was to bring in extra income. In order to further analyse the links

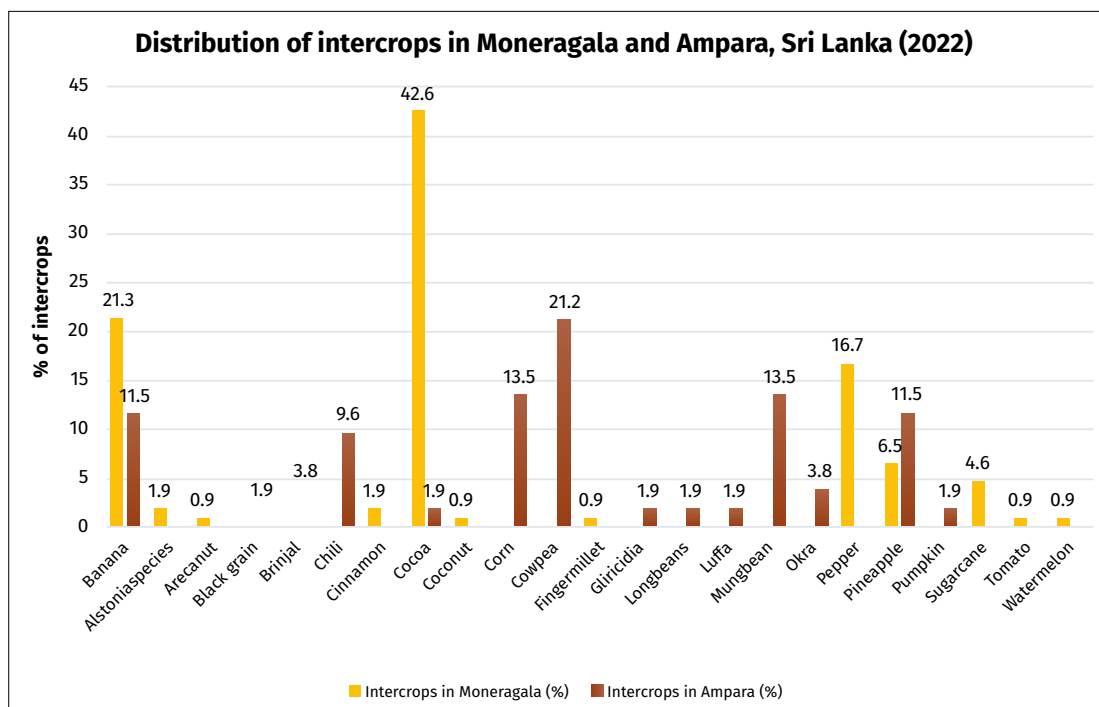


Figure 3. Distribution of rubber tree intercrops in Moneragala and Ampara.

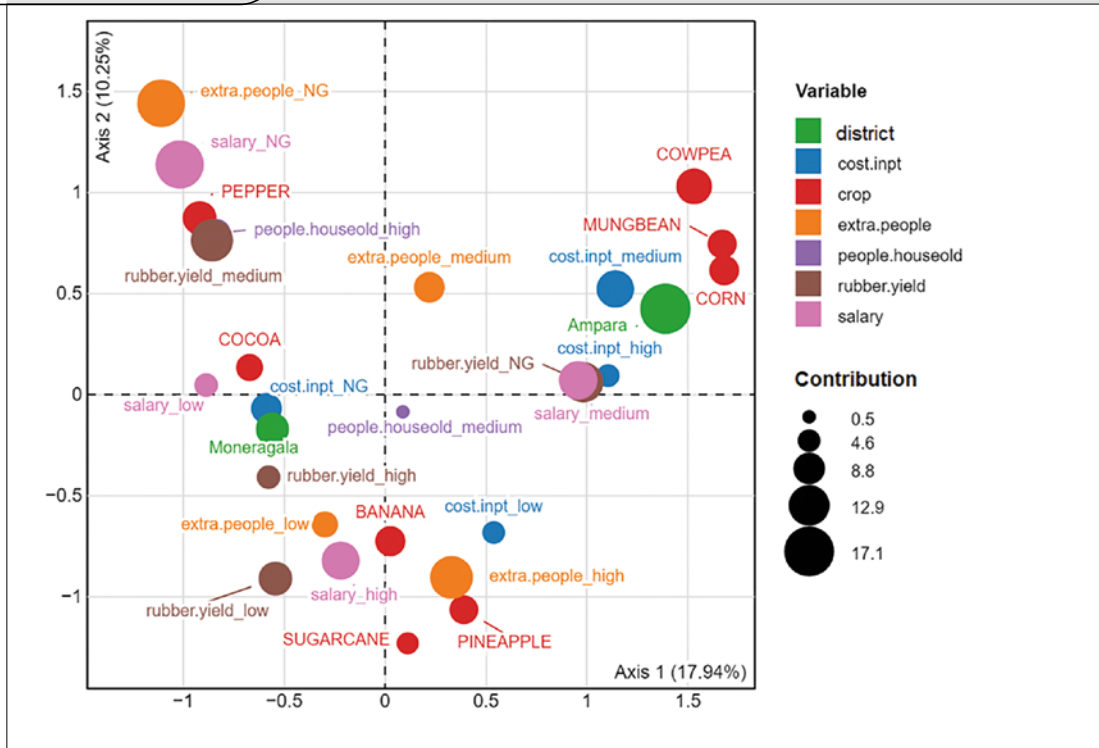


Figure 4.
MCA of economic performance data.

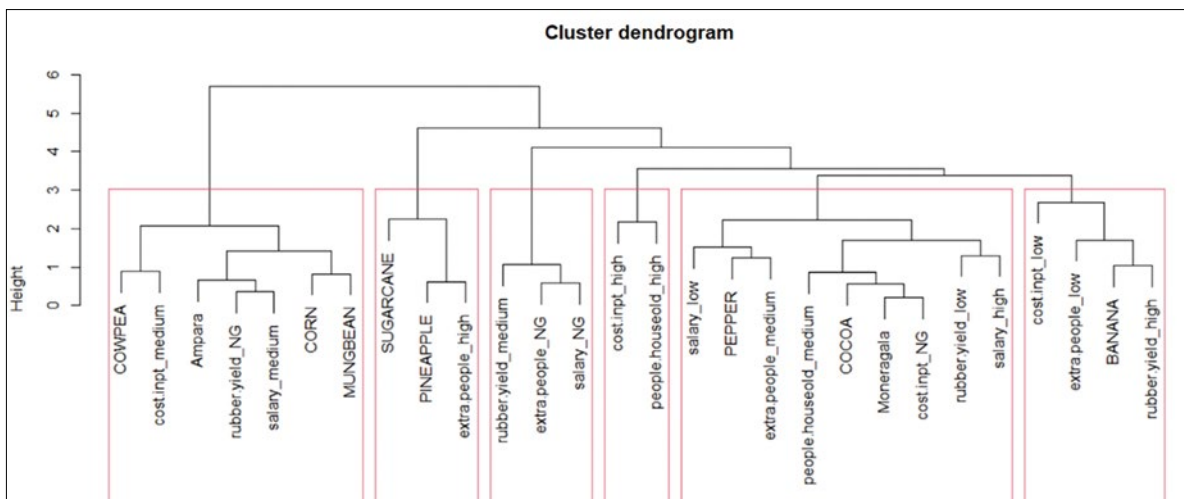


Figure 5.
Cluster dendrogram of economic performance data.

Table IX.

P-value of the “major issues”. P-values less than 0.05 indicate independent variables in grey.

	Pest attack	Lack of water	Lack of input	Wild animal attack	Lack of labour	Drought marketing	Fuel crisis	High labour cost	Lack of harvest
Crop	0.04993	0.5604	0.03587	0.02741	0.1415	0.4578	0.03018	0.6523	0.2675

between the variables, Chi² tests have been carried out. The null hypothesis of this test is “there is no interdependence between the variables”. Only Chi² test with a p-value lower than 0.05 are interdependent. The p-values of the performance variables, the main issues variables and the adoption variables have been reported in tables IX, X and XI. Below are the p-values of the variables related to economic performance, the main issues encountered by farmers and the reasons for adopting intercrops; p-values below 0.05, i.e., the variables are interdependent, are in green.

Global interpretation

The statistical results of the interviews with farmers reveal that the main reason why farmers have chosen to grow intercrops in rubber cultivation is to earn extra income. A variety of intercrop choices are available, but *societies* encourage to grow cash crops such as cocoa, banana and pepper. However, banana, pepper and sugar cane are labour intensive crops and require producers to hire employees. This is a fact which needs to be taken into consideration as there is a relatively high labour deficit in Moneragala and Ampara. On the other hand, cocoa is subject to recurrent attacks by wild animals. However, some crops have a positive impact on the soil, such as cowpea, mungbean and corn, while banana increases the rubber growth. Finally, markets seem to be poorly developed in the study areas, which may justify the lack of interest of all farmers for intercropping.

Results of the focus groups

Each focus groups’ feedback has been drawn up by LOAM as summarized in tables XII and XIII. The objective is

to establish intercrop models with rubber trees adapted to the study areas. Based on the literature review and on the field surveys’ analysis, YAPI Expertise was able to select a final list of interesting crops (and potentially adopted by local smallholders) for the modeling of intercropping systems. The list of the final selected crops is based on the performance and adoption criteria of the field surveys combined with the results of the bibliographic study (in annexes 1 & 2).

LOAM and YAPI Expertise made together the final choice of the crops which would be part of the models in order to fulfill the demand from surveyed farmers. Banana, pineapple, cocoa and mung-bean are crops that already exist as intercrops in the study areas, as the field survey showed, and they have been selected. However, sugarcane, corn and pepper were not efficient enough. Indeed, sugarcane and corn are very low in the ranking of the literature search. From an agronomic point of view, they need a lot of water to develop, a need that can hinder rubber trees’ growth. From a socio-economic point of view, their maintenance costs (chemical inputs, seed costs and workforce) are high, and therefore, less attractive for producers to implement. Regarding pepper, the cultivation calendar does not correspond to the climatic conditions of the study areas because of global warming. The changing of seasons does not allow the flowering of pepper. Cowpea was also not included in the final list because the corn-cowpea association is already widespread and does not correspond to an agronomic innovation in the study areas. On the other hand, groundnut, *Mucuna* sp., butterfly pea and neem are crops not identified in the field surveys. However, LOAM found it interesting to include them in the models because they are already well-established crops in the study areas. All these models have been discussed in focus groups with local communities.

Five models have been identified along three axes, spatial, temporal and functional: i) the pineapple model, ii) the cocoa model, iii) the banana model, iv) the passion fruit model and v) the soursop model (annex 3). The time of cultivation on the plot, the periods of sowing, growth, maintenance and harvesting are explained for each model. The models are built over the first ten years of the rubber tree. It might be different during mature phase (after 7 years when rubber canopy is closed) as shadow might not be compatible in particular in normal spacing system. The cropping association would be different during mature

Table X.
P-values of the economic performance. P-values less than 0.05 indicate independent variables in grey.

	District	Rubber yield	Cost input	People household	Extra people	Salary
Crop	8,62E-16	0,2098	0,7923	0.4163	7.25E-06	6.93E-06

Table XI.
P-values of the “adoption”. P-values less than 0.05 indicate independent variables in grey.

	Moisture conservation	Soil erosion	Extra income	Society choice	Less maintenance cost for rubber	Adapted to climate	Easy maintenance	Support rubber growth	Soil nutrition	Shade
Crop	0.000003614	0.6306	0.9706	0.1776	0.09223	0.00000000002119	0.01297	0.0001769	1.923E-07	0.5242

Table XII.
Summary of the focus groups.

Subject	Comments
Agronomic part	
General trends of intercrops	There are many annual plants in the immature phase (mungbean, finger millet, corn, cowpea) and cocoa in the mature phase.
Most wanted intercrops	Cocoa and pineapple: they have positive impacts on the plot environment / Moisture conservation and climate. Corns, mungbean, finger millet, cowpea: well-known crops to producers and used for self-consumption / Safe annual crops.
Historical of the lands	The rubber lands were previously “chena” ¹ cultivated area where corn, pepper or sugar cane were cultivated, which became less fertile.
Origin of the seeds	Producers buy their seeds from private or government agencies. Prices fluctuate between sellers but remain similar from one area to another.
Rubber yield	Buyers indicate the same latex yields, which are around 1,000 kg/ha/year and do not differ between areas. However, producers report much higher yields. The yields are higher than average, suggesting that producers are exaggerating their yields.
Workforce and salary	It is difficult to analyse the workforce required by crop. Sugar cane cultivation requires a larger workforce. Salaries are the same in all areas.
Major issues faced by producers	Producers face the same issues in all three zones. They are the following: animals attacks, lack of knowledge and technical materials, expensive workforce, problem of producers’ behaviour.
Economic part	
Intercrop network	Not very common. Especially for cocoa and sugar cane crops.
Certification	Certifications are specific to the zones and to the cocoa crop.
Collection site	Only few existing sites in Moneragala, especially for cocoa and pepper.
Type de contract	Agreements between the producers and the societies.
Major downsides of the societies	Weak organisation is reported as well as internal conflicts within societies and with producers. Producers tend to sell their products outside the societies because the societies do not sell them at prices that are attractive to the producers. Societies are therefore very unstable, and producers have little hope for the future of these organisations.
	¹ Slash-and-burn.

Table XIII.
Final selection of the intercrops for the models.

Types of crop	Crop species
Cash crop	<i>Annona muricata</i>
	<i>Theobroma cacao</i>
	<i>Ananas comosus</i>
	<i>Passiflora edulis</i>
Cover crop	<i>Vigna radiata</i>
	<i>Arachis hypogaeae</i>
	<i>Clitoria ternatea</i>
	<i>Mucuna pruriens</i>
Timber crop	<i>Azadirachta indica</i>

phase focus has been put on cropping models for the first ten years in that case for that particular study. Finally, the spatial and functional axes are represented in the diagrams below. Each model represents different intercrop combinations according to the farmers’ cropping patterns. The study also proposes different intercrop’s possibility according to the plots’ profile. In addition, the following criteria have been assessed for each model: the study area, the soil, the surface of the plot, the workforce, the initial investment and the risk of wild animal attacks.

These 5 models are those selected by farmers in the current conditions of existing markets and prices system. They represent the type of systems that would probably be most adopted by local farmers in the second phase of the project with focus on rubber-based agroforestry systems development. The next step of the RIVER project is to promote through extension activities the recommended systems for the period 2023-2024. The prospective analysis is intended to gain time through the participatory approach for further development.

Conclusion and recommendations

YAPI Expertise's study was conducted as a desk study due to social unrest in the country but was completed by a local survey implemented by partner NGO. Firstly, the literature review on intercropping provided a high amount of data on each crop showing a relatively high level of knowledge and know-how on intercropping. These data were obtained from scientific as well as grey literature (not included in the bibliography of this publication). The data have been verified and sometimes adapted by experts to profit from experience and reliability. Such analysis should be later on counter-verified by local visits, the data needed to define the criteria for intercrop selection were sometimes difficult to find and to adapt to different soils or rainfall conditions. Data were provided to local stakeholders for analysis. Furthermore, for certain reasons, some of the data provided during the interviews had outliers and were not considered in the analysis. Finally, the intercropping models were mainly based on agronomic data. The lack of information on social categories (labor availability, labor requirement, etc.) and economic categories (input costs, place of crops on the Sri Lankan market, selling costs of crops, etc.) led to the construction of models based on a questionable database.

Indeed, a performant model cannot rely only on agronomic analysis. In order to adapt these models to the reality of the country, it will be essential to budget inputs and adapt the choice of crops to the local market (consumer demand, presence of collection and resale centers, etc.) and above all to the farmers' needs. Most of the current proposal has been discussed in focus groups with local communities but further monitoring should be done when development phase will be launched in 2023-2024 in order to ensure the best possible adaptability to local conditions. This exploratory research activity enables the RIVER project to move rapidly to extension.

Acknowledgement

This study has been implemented by a group of 9 students (YAPI Expertise) from ISTOM in the framework of the Young Expert Consulting program developed by ISTOM since 2010. We would like to thank Ludovic Andrès, for his collaboration with Ksapa in the design of the Terms of Reference

of this study in relation with the RIVER project implemented in Sri Lanka. We also want to thank Raphaël Haras, CEO of the RIVER project, Hatim Hissoufaly, program director, and Adrien Covo, development officer. The authors express their gratitude to Alexis Thoumazeau and Charlotte Simon from CIRAD, and to LOAM, the local project partner, and in particular to Thilak Kariyawasam and his team and Camso Loadstar.

Funding

The study was financed by a subsidy from FASEP. As part of the RIVER project, two-thirds of the project was financed by the sustainable development subsidy provided by the French Ministry of the Economy, known as FASEP. In the funding application, an amount was allocated for this study. This subsidy was used to fund field trips, organize focus groups and pay the field teams.



Photo 2.

Focus group discussion with LOAM's officer, Michelin Lanka experts, society farmers' representatives and export company's representatives.
Photo LOAM's officer.

Annex 1.

Final selection of potential intercrops for the immature phase of rubber tree. Green is suitable, red is not suitable, yellow in between.

Final crop selection table - Immature phase of rubber tree							
Crops	Climate		Temperature (15-30 °C)	Altitude (< 600 m)	Resistance to high heat	Resistance to wind	Resistance to heavy rain
	Rainfall during the dry season (600-1,200 mm/year)	Rainfall during the wet season (1,200-3,000 mm/year)					
Degree of impact	4	4	4	3	3	2	2
<i>Alpinia oxiphylla</i> - black cardamom	4	4	4	3	1,5	2	2
<i>Ammonum villosum</i> - medicinal cardamom	2	4	4	1,5	1,5	2	2
<i>Arachis hypogaea</i> L. - groundnut	4	4	4	3	3	1	0
<i>Cajanus cajan</i> (L.) - pigeon pea	4	4	4	3	3	2	0
<i>Calopogonium caeruleum</i>	2	4	4	3	3	2	2
<i>Citrullus colocynthis</i> - bitter cucumber	0	4	4	3	3	2	0
<i>Citrullus lanatus</i> - watermelon	0	4	4	3	1,5	2	1
<i>Ipomoea batatas</i> L. - sweet potato	2	4	4	3	3	1	2
<i>Manihot esculenta</i> - cassava (culture < 12 months)	4	4	4	3	3	2	2
<i>Mucuna bracteata</i>	4	4	4	3	3	2	2
<i>Mucuna cochinchinensis</i>	4	4	4	3	3	2	2
<i>Noicotiana</i> spp. - tobacco	0	4	4	3	3	2	2
<i>Oryza sativa</i> L. - upland rice	0	4	2	3	1,5	2	2
<i>Psophocarpus tetragonolobus</i> (L.)	4	4	4	3	3	2	1
<i>Sorghum bicolor</i> (L.) - sorghum	4	2	4	3	3	1	1
<i>Vigna radiata</i> (L.) - mung bean	4	0	4	3	3	2	2
<i>Vigna unguiculata</i> - cow pea	4	4	4	3	3	1	2
<i>Ananas comosus</i> (L.) - pineapple	4	4	4	3	3	2	2
<i>Capsicum annuum</i> L. - chili pepper	4	4	4	3	3	1	0
<i>Luffa acutangulas</i> - angled loofah	4	4	4	3	3	2	1
<i>Musa acuminata</i> - banana	2	4	4	3	1,5	0	1
<i>Pogostemon cablin</i> (Blanco) - patchouly	2	4	4	3	1,5	1	1
<i>Saccharum officinarum</i> L. - sugar cane	2	2	4	3	3	2	2
<i>Arachis pintoi</i>	2	4	4	3	3	2	1
<i>Crotalaria pubescens</i> - butterfly pea	2	4	4	3	3	2	2
<i>Coffea canephora</i> - coffea robusta	0	4	4	3	3	2	2
<i>Crotalaria</i> spp. - rattlepods	2	4	4	3	3	2	1
<i>Curcuma domestica</i> - turmeric	2	4	4	3	3	2	2
<i>Cymbopogon citratus</i> (DC.) - lemon grass	2	4	4	3	3	2	1
<i>Flemingia macrophylla</i>	2	4	4	3	3	2	2
<i>Glycine max</i> (L.) - soybean	2	4	4	3	1,5	2	1
<i>Morinda officinalis</i> - morinda	4	4	4	1,5	3	1	2
<i>Pueraria phaseoloides</i> - tropical kudzu	2	4	4	3	3	2	2
<i>Stylosanthes guianensis</i> - common stylo	2	4	4	3	3	2	2
<i>Theobroma cacao</i> L. - cocoa	2	4	4	3	3	2	2
Key							
Annual plants							
Multiannual plants							
Perennial plants							
Refers to the criteria's definitions							
Refers to the criteria's definitions							
Refers to the criteria's definitions							
Unknown information							

Soil				Crop				Need of mechanisation	Mark
Adaptation to Reddish brown earth and Red yellow podzolic soil (pH = 4.5-6)	Adaptation to Vertisol (pH = 7-7.5)	Adaptation to feralitic soil (pH = 5-6.5)	Biomass to be returned to the soil	Water competition with rubber trees	Light competition from rubber trees	Required space between crops and rubber trees			
4	4	4	1	4	4	4	2	49	
4	4	4	1	2	2	4	2	42	
4	4	2	1	4	4	4	2	42	
4	0	4	1	4	4	4	2	42	
2	2	4	1	4	4	4	1	42	
4	2	4	1	4	2	4	2	41	
4	4	4	0.5	2	4	4	2	40.5	
2	0	4	0.5	4	2	4	2	34	
4	0	4	0.5	4	2	4	2	39.5	
4	2	2	0.5	4	4	4	2	44.5	
4	2	4	1	4	2	4	2	45	
4	2	4	1	4	2	4	2	45	
4	4	4	0.5	4	2	4	2	42.5	
2	2	4	0.5	2	2	4	1	32	
4	2	2	0.5	2	2	4	2	39.5	
2	4	4	0.5	4	2	4	2	40.5	
2	2	2	1	4	4	4	2	39	
2	4	4	1	4	2	4	2	44	
4	0	4	1	2	4	4	2	42	
4	0	4	0.5	4	4	4	2	41.5	
0	2	4	0.5	4	2	4	2	39.5	
4	4	4	0.5	2	4	4	2	40	
4	2	4	0.5	2	4	4	2	39	
2	0	4	1	0	2	4	2	33	
4	4	4	1	4	4	4	2	46	
4	4	4	1	4	4	4	2	47	
4	4	4	0.5	2	2	2	1	37.5	
2	4	2	1	2	4	4	2	40	
2	0	4	0.5	4	2	4	1	37.5	
2	4	4	0.5	4	2	4	2	41.5	
4	4	4	1	4	2	4	2	43	
2	2	4	0.5	4	4	4	2	40	
4	2	4	0,5	4	4	4	2	40	
4	2	4	1	4	2	4	2	43	
4	0	4	1	2	4	4	2	41	
4	4	4	1	2	2	2	1	40	

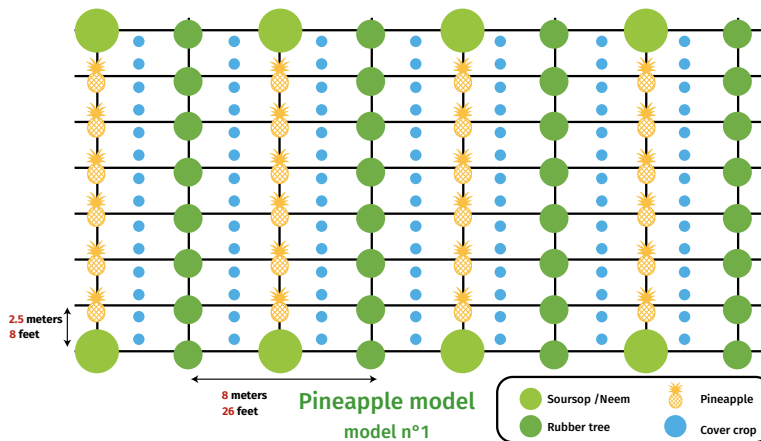
Annex 2.

Final selection of potential intercrops for the mature phase of rubber tree. Green is suitable, red is not suitable, yellow in between.

Final crop selection table - Mature phase of rubber tree							
Crops	Climate			Altitude (< 600 m)	Resistance to high heat	Resistance to wind	Resistance to heavy rain
	Rainfall during the dry season (600-1,200 mm/year)	Rainfall during the wet season (1,200-3,000 mm/year)	Temperature (15-30 °C)				
Degree of impact	4	4	4	3	3	2	2
<i>Ammonum villosum</i> - medicinal cardamom	2	4	4	1.5	1.5	2	2
<i>Calopogonium caeruleum</i>	2	4	4	3	3	2	2
<i>Piper nigrum</i> L. - pepper	4	4	4	3	0	2	0
<i>Carica papaya</i> L. - papaya	4	4	4	3	1.5	0	2
<i>Vanilla fragrans</i> - vanilla	4	4	4	3	0	1	2
<i>Anacardium occidentale</i> L. - cashew nut	4	4	4	3	3	2	1
<i>Annona reticulata</i> L. - custard-apple	4	4	4	3	3	0	1
<i>Aquilaria</i> sp. - eaglewood	4	4	2	3	3	1	1
<i>Arachis pintoï</i>	2	4	4	3	3	2	1
<i>Areca catechu</i> - betel nut tree	2	4	4	3	3	1	2
<i>Artocarpus altilis</i> - breadfruit	2	4	4	3	3	2	2
<i>Artocarpus heterophyllus</i> - jackfruit	2	4	4	3	1.5	2	2
<i>Azadirachta indica</i> - neem	4	4	4	3	3	2	2
<i>Centrosema pubescens</i> - butterfly pea	2	4	4	3	3	2	2
<i>Cinamomum verum</i> - cinnamon	2	4	4	3	3	2	2
<i>Citrus aurantiifolia</i> - lime	2	4	4	3	1.5	1	1
<i>Citrus x paradisi</i> - grapefruit	2	4	4	3	1.5	1	1
<i>Citrus reticulata</i> - tangerine	2	4	4	3	1.5	1	1
<i>Citrus x sinensis</i> - orange	2	4	4	3	1.5	1	1
<i>Cocos nucifera</i> - coconut	2	4	4	3	3	2	2
<i>Durio zibethinus</i> - durian	2	4	2	3	3	1	2
<i>Fagraea fragrans</i> - iron wood	4	4	4	3	3	2	2
<i>Garcinia mangostana</i> L. - mangosteen	2	4	4	3	3	1	2
<i>Gmelina arborea</i> - gmelina	4	4	4	3	3	2	2
<i>Macadamia</i> sp. - macadamia nut	4	4	4	3	3	0	2
<i>Mangifera indica</i> L. - mango	4	4	4	3	1.5	1	1
<i>Morinda officinalis</i> - morinda	4	4	4	1.5	3	1	2
<i>Nephelium lappaceum</i> L. - rambutan	4	4	4	3	3	1	2
<i>Paraserianthes falcataria</i> (L.) - white albizia	2	4	4	3	3	2	2
<i>Parkia speciosa</i> - stink bean	4	4	4	3	3	2	2
<i>Passiflora edulis</i> Silms - passion fruit	4	4	4	3	1.5	1	1
<i>Pterocarpus</i> sp. - padouk, narra	2	4	4	3	3	2	2
<i>Pueraria phaseoloides</i> - tropical kudzu	2	4	4	3	3	2	2
<i>Salacca zalacca</i> - snake fruit	4	4	4	3	1.5	1	1
<i>Shorea macrophylla</i> - light red meranti	4	4	4	3	3	2	2
<i>Stylosanthes guianensis</i> - common stylo	2	4	4	3	3	2	2
<i>Tectona grandis</i> L. - teak	2	4	4	3	1.5	1	2
Key							
Annual plants							
Multiannual plants							
Perennial plants							
Refers to the criteria's definitions							
Refers to the criteria's definitions							
Refers to the criteria's definitions							
Unknown information							

Soil				Crop		Required space between crops and rubber trees	Need of mechanisation	Mark
Adaptation to Reddish brown earth and Red yellow podzolic soil (pH = 4.5-6)	Adaptation to Vertisol (pH = 7-7.5)	Adaptation to feralitic soil (pH = 5-6.5)	Biomass to be returned to the soil	Water competition with rubber trees	Light competition from rubber trees			
4	4	4	1	4	4	4	2	49
4	4	2	1	4	4	4	2	42
4	2	4	1	4	2	4	2	41
2	4	4	0.5	4	4	4	2	41.5
2	2	2	0.5	2	2	4	2	35
2	2	4	0.5	2	4	4	2	38.5
4	2	2	1	2	2	2	2	38
4	2	2	0.5	2	4	4	2	39.5
4	4	4	1	4	4	4	2	45
4	4	4	1	4	4	4	2	46
4	2	2	0.5	2	2	4	2	37.5
4	4	4	0.5	2	2	2	2	40.5
4	4	4	0.5	2	2	2	2	39
4	4	4	1	4	4	4	2	49
4	4	4	1	4	4	4	2	47
4	2	2	0.5	4	2	4	2	40.5
2	2	4	0.5	2	2	4	2	35
2	4	4	0.5	2	2	4	2	37
4	2	4	0.5	2	2	4	2	37
4	2	4	0.5	2	2	4	2	37
4	4	4	0.5	2	4	4	2	44.5
4	2	4	1	2	2	2	2	36
4	2	4	1	4	2	4	2	45
2	2	4	1	2	4	4	2	40
2	2	4	1	4	2	4	2	43
4	0	2	1	2	2	2	2	35
4	4	4	1	2	2	4	2	41.5
4	2	4	0.5	4	4	4	2	40
4	2	4	1	2	2	4	2	42
2	4	2	1	4	2	4	2	41
0	2	4	1	4	2	4	2	41
2	4	4	0.5	2	4	4	2	41
4	4	4	1	4	4	4	2	47
4	2	4	1	4	2	4	2	43
4	0	4	0.5	4	2	4	2	39
4	0	4	0.5	4	2	2	2	40.5
4	0	4	1	2	4	4	2	41
4	4	4	1	4	2	4	1	41.5

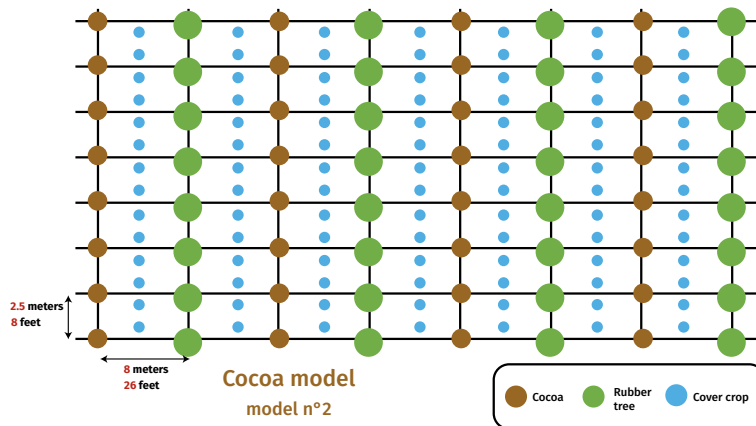
Annex 3.

**Criteria :**

- Place: Moneragala and Ampara
- Field: 1 ha+
- Labour force: ***
- Initial cost: ***
- Wild animals: **

Model 1: Pineapple Model

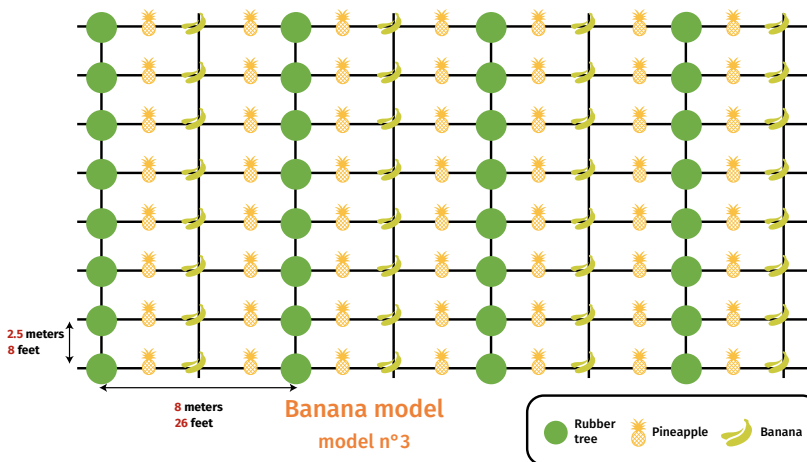
In this first model, there is a row of pineapples between two rows of rubber trees, that are surrounded by a cover crop. The choice of the cover crop is free. Finally, Neem trees frame the plot, as they are quite imposing and take a lot of space. The framing of the plot by these kind of trees limits attacks by fungi. Moreover, they do not require any maintenance work. When the rubber trees have reached the mature phase, the amount of light that filters through the canopy will be too low and the cover crops will disappear by themselves as well as pineapple. It means that during the mature phase of the rubber tree, only remain neem trees.

**Criteria :**

- Place: Moneragala and Ampara
- Field: 0,4 - 1 ha
- Labour force: ****

Model 2: Cocoa Model

The second model is based on cocoa trees placed between rows of rubber trees. There are also cover crops between the rubber trees and the cocoa. They aim to limit weeds and fix nitrogen in the soil. Like the first model, the cover crops will disappear by themselves when the shade provided by the rubber trees is too important. However, the cocoa trees will still be present during the mature phase of the rubber trees, but a decrease in cocoa's yield is likely to be observed.

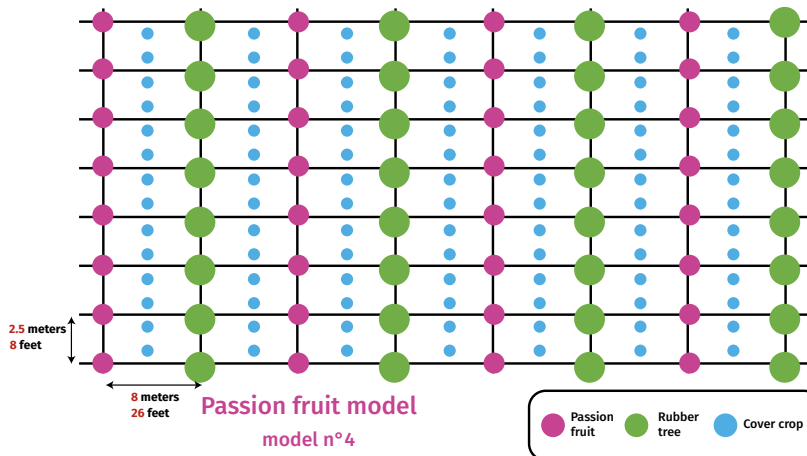


Criteria :

- Place: Moneragala and Ampara
- Field: 0,4 - 1 ha
- Labour force: ***
- Initial cost: ***
- Wild animals: **

Model 3: Banana Model

Banana Model has been enthusiastically welcomed by LOAM, particularly because of the combination of rubber and banana. According to Rodrigo, the combination of rubber and banana allows for a better use of resources in the soil. A row of pineapple has also been added between the rubber and banana rows. These intercrops can be grown for the first 6 years of the rubber tree's life. After that the tree canopy will be too important and the amount of light too low to enable the bananas and pineapples to grow. From the 7th year onwards, the field will be a monoculture of rubber trees.

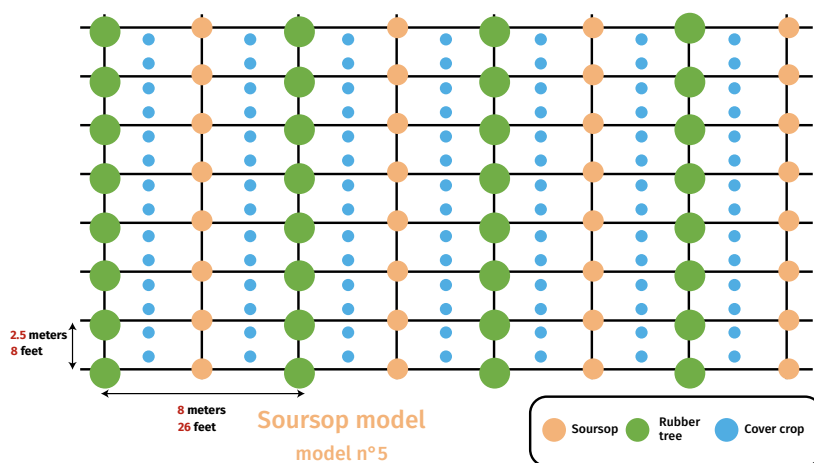


Criteria :

- Place: Ampara
- Field: 0,4 - 1 ha

Model 4: Passion fruit Model

This model is highly advised in Ampara and in the driest areas of Moneragala. Indeed, the passion fruit is a liana that needs sun and a dry climate to grow properly and produce fruit. Passion fruit should be planted during the immature period of the rubber tree and then removed during the mature period. A cover crop is planted between the rubber trees and the passion fruits like in the first two models. The cover crop will disappear during the mature phase of the rubber tree, leaving the plot in monoculture.



Criteria :

- Place: Moneragala and Ampara
- Field: 0,4 - 1 ha

Model 5: Soursop Model

The last model is based on the recommendations of local stakeholders. Soursop is a fruit tree already present in Sri Lanka, in this model it is planted in the immature phase of the rubber tree and remains on the plot throughout the life of the rubber tree. Between the trees' rows, cover crops are planted, which will disappear during the mature phase of the rubber tree.

References

Ampara District Secretariat, 2020. Website. <https://lankainformation.lk/directory/government/divisional-secretariats/10380-amparadistrict-secretariat>

CIRAD. 2019. Agroforesterie et services écosystémiques en zone tropicale. Website. CIRAD. <https://www.cirad.fr/en/cirad-news/news/2019/ca-vient-de-sortir/agroforesterie-et-services-ecosystemiques>

Dissanayake D. M. P., Geretharan T., Hariharan G., 2016. A Study on Smallholder Rubber Production in Moneragala District, Sri Lanka. International Journal of Advanced Research and Review, 1 (5): 25-33. https://www.researchgate.net/publication/344343154_A_STUDY_ON_SMALLHOLDER_RUBBER_PRODUCTION_IN_MONARAGALADISTRICT_SRI_LANKA

Gunarathne P. K. K. S., Tennakoon T. M. S. P. K., Edirisinghe J. C., Mahindapala K. G. J. P., 2020. The present status and role of the *Thurusaviya* Rubber Societies in the smallholder rubber sector in Moneragala District: Extension Officers' perception. Journal of the Rubber Research Institute of Sri Lanka, 100: 55-68. <https://doi.org/10.4038/jrrisl.v100i0.1899>

Jongrungrot V., Thungwa S., Snoeck D., 2014. Tree-crop diversification in rubber plantations to diversify sources of income for small-scale rubber farmers in Southern Thailand. Bois et Forêts des Tropiques, 321: 21-32. <https://doi.org/10.19182/bft2014.321.a31214>

Kam O., 2013. Les déterminants de l'adoption des innovations culturelles en milieu rural : illustration à partir du cas du soja introduit par le CNRA (Centre national de recherche

agronomique) dans la Région Nord de la Côte d'Ivoire. Revue Ivoirienne d'Histoire, 22 : 140-156. http://revues-ufhb-ci.org/fichiers/FICHIR_ARTICLE_1166.pdf

Karunaratne S., Gunathilake J., Wijesuriya W., Herath K., Samarappuli L., 2011. Land suitability model for rubber in Moneragala district: first approximation using GIS. Journal of the Rubber Research Institute of Sri Lanka, 91: 49-60. <https://doi.org/10.4038/jrrisl.v91i0.1852>

Langenberger G., Cadisch G., Martin K., 2016. Rubber intercropping: a viable concept for the 21st century? Agroforestry Systems, 91: 577-596. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-9961-8>

Ministry of Agriculture of Sri Lanka, 2016. Performance report 2016. Ministry of Agriculture of Sri Lanka, 195 p. <https://www.parliament.lk/uploads/documents/paperspresented/performance-report-ministry-of-agriculture-2016.pdf>

Ministry of Agriculture of Sri Lanka, 2019. Website of the Ministry. <https://agrimin.gov.lk/web/>

Ministry of Plantation Industries and Export Agriculture, 2019. Annual performance report for the year 2019. Expenditure Head No 135. Ministry of Plantation Industries and Export Agriculture, 57 p. <https://www.parliament.lk/uploads/documents/paperspresented/performance-report-ministry-of-plantation-industries-2019.pdf>

Penot E., 2004a. Improved rubber agroforestry systems. In: Lançon F., Ruf F. (eds). From Slash and Burn to Replanting: Green Revolutions in the Indonesian Uplands. World Bank, Regional and Sectoral Studies, 28987, 366 p. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/226161468771662663/pdf/289870PAPER0From0slash010burn.pdf>

Penot E., 2004b. From shifting agriculture to sustainable rubber agroforestry systems (jungle rubber) in Indonesia:

a history of innovations processes. In: Babin D. (ed.). Beyond tropical deforestation: from tropical deforestation to forest cover dynamics and forest development. Montpellier, CIRAD, 221-249. <https://agritrop.cirad.fr/523265/>

Penot E., 2001. Stratégies paysannes et évolution des savoirs : l'hévéaculture agro-forestière indonésienne. Thèse de doctorat, Université Montpellier 1, France, 360 p. <https://agritrop.cirad.fr/487285/>

Penot E., Ollivier I., 2009. L'hévéa en association avec les cultures pérennes, fruitières ou forestières : quelques exemples en Asie, Afrique et Amérique latine. Bois et Forêts des Tropiques, 301 : 67-82. <https://doi.org/10.19182/bft2009.301.a20407>

Rodrigo V. H. L., Silva T. U. K., Munasinghe E. S., 2004. Improving the spatial arrangement of planting rubber (*Hevea brasiliensis* (A. Juss.) Müll. Arg.) for long-term intercropping. Field Crops Research 89: 327-335. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.02.013>

Rodrigo V. H. L., Iqbal S. M. M., Dharmakeerthi R. S., 2011. Potential for rubber (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.) cultivation in the Eastern Province of Sri Lanka. Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka, 39: 403-411. <https://doi.org/10.4038/jnsfsv.39i4.3888>

Rubber Research Institute of Sri Lanka (RRISL), 2020. RRISL, Annual Report 2019. Dartonfield, Agalawatta, Sri Lanka, 95 p. <http://www.rrisl.gov.lk/content/files/annualReports/Annual%20Report%202020%20-%20English.pdf>

Sankalpa J. K. S., Wijesuriya W., Ishani P. G. N., 2020. Do rubber-based agroforestry practices build resilience upon poverty incidence? A case study from Moneragala district in Sri Lanka. Agroforestry Systems 94: 1795-1808. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00502-9>

Snoeck D., Lacote R., Kéli J., Doumbia A., Chapuset T., et al., 2013. Association of hevea with other tree crops can be more profitable than hevea monocrop during first 12 years. Industrial Crops and Products, 43: 578-586. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.07.053>

Somboonsuke B., Wetayaprasit P., Chernchom P., Pacheerat K., 2011. Diversification of Smallholding Rubber Agroforestry System (SRAS) Thailand. Kasetsart Journal of Social Sciences, 32: 327-339. <https://www.thaiscience.info/journals/Article/TKJS/10800932.pdf>

Sri Lanka Export Development Board, 2022. Sri Lanka's Export Performance in May 2022. Website. <https://www.srilankabusiness.com/news/sri-lankas-export-performance-in-may-2022.html>

Stroesser L., Penot E., Michel I., Tongkaemkaew U., Chambon B., 2018. Income diversification for rubber farmers through agroforestry practices. How to withstand rubber price volatility in Phatthalung Province, Thailand. Revue Internationale des Études du Développement, 235: 117-145. <https://www.cairn.info/revue-internationale-des-etudes-du-developpement-2018-3-page-117.htm>

Workman D., 2022. Sri Lanka's Top 10 Exports. Website. World's Top Exports. <https://www.worldstopexports.com/sri-lankas-top-10-exports/>

Yasaratne S. E., Jayatilake A., Senevirathne C., 1992. An environmental profile of the Moneragala District. Central Environmental Authority. Agridev Consultants report for Central Environmental Authority with NORAD, 49 p. <https://core.ac.uk/download/pdf/52178704.pdf>

Zahm F., Alonso Ugaglia A., Del'Homme B., 2013. L'évaluation de la performance globale d'une exploitation agricole. Synthèse des cadres conceptuels, des outils de mesure et application avec la méthode IDEA. Huitième Congrès du RIODD, 18-21 juin 2013, Lille, France, 33 p. <https://hal.inrae.fr/hal-00862865>

Penot et al. – Author's contributions

Contributor role	Contributor names
Conceptualization	Ksapa, H. Ellis, L. Guillonnet, A. Leguen, C. Gallier, L. Schirmer, S. Schoepfer, P. Fenech, J. Laville, A. Chevreux
Data Curation	LOAM, H. Ellis, L. Guillonnet, A. Leguen, C. Gallier, L. Schirmer, S. Schoepfer, P. Fenech, J. Laville, A. Chevreux
Formal Analysis	H. Ellis, L. Guillonnet, A. Leguen, C. Gallier, L. Schirmer, S. Schoepfer, P. Fenech, J. Laville, A. Chevreux
Funding Acquisition	Ksapa
Investigation	LOAM, H. Ellis, L. Guillonnet, A. Leguen, C. Gallier, L. Schirmer, S. Schoepfer, P. Fenech, J. Laville, A. Chevreux
Methodology	H. Ellis, L. Guillonnet, A. Leguen, C. Gallier, L. Schirmer, S. Schoepfer, P. Fenech, J. Laville, A. Chevreux, C. Durand, E. Penot
Project Administration	Ksapa, C. Durand,
Resources	Ksapa, C. Durand
Software	H. Ellis, L. Guillonnet, A. Leguen, C. Gallier, L. Schirmer, S. Schoepfer, P. Fenech, J. Laville, A. Chevreux
Supervision	E. Penot, C. Durand
Validation	E. Penot, C. Durand
Visualization	E. Penot, MJE YAPI Expertise, C. Durand
Writing – Original Draft Preparation	E. Penot, MJE YAPI Expertise
Writing – Review & Editing	E. Penot, MJE YAPI Expertise, C. Durand

Bois et Forêts des Tropiques - Revue scientifique du Cirad -
 © Bois et Forêts des Tropiques © Cirad



Cirad - Campus international de Baillarguet,
 34398 Montpellier Cedex 5, France
 Contact : bft@cirad.fr - ISSN : L-0006-579X

Webinar: Agroforestry systems in the world: differences and similarities

Conference date: 26-27 July 2023, Greenwich Mean Time (London/Lisbon)
Conference place: online

Swoyambhu Man Amatya, Jens Peter, Ana Cristina Gonçalves, Sanjeev Chauhan (EDS)

Link to online file: [Book of Abstracts](#)



Agroforestry is a land use system that integrates forest crops, agriculture crops, livestock including Medicinal and Aromatic plants in a given space and time. These practices can provide a sound ecological basis for increased crop and animal productivity, more dependable economic returns, and conserving biodiversity. It an important role in providing livelihood security and buffering households against climate related risks. These practices practice are increasingly becoming attractive in almost all Asian countries and in the World. It has been estimated that about 1.2 billion people, particularly in developing countries, depends on agroforestry farming systems for their livelihood.

This Agroforestry Research Group is involved in promoting agroforestry program/ activities through organizing and participating various fora. It has organized and participated various International Workshops, International events related with forests and forestry related with agroforestry discipline. The present online conference, held for two days (26-27 July 2023) is the continuation of its activities. Its goals are to analyze and discuss the concepts, productions and their ranking, the species and the stand structure, the management options, the modelling and the practices of agroforestry systems. The online conference has expected to get some answer in the following issues:

- Are agroforestry systems adapted to climate variability (and/or climate change)?
- How can integration and ranking of the multiple productions in agroforestry systems can be achieved and maintained?
- Do species and site contribute to the diversity of agroforestry systems?
- Are management options and practice similar or different from the timber-oriented forest systems?

The book of abstract has been prepared as a reference knowledge product for all those who had attended the online conference and for others interested in this discipline.

It is very encouraging to have more than 350 registrations and 70 participants in this event all over the World. Because of the disruption of internet some of our participants couldn't attend and present the abstract.

Adapted from Swoyambhu Man Amatya's Preface, as Coordinator, IUFRO Agroforestry Research Group (1.04.00).

Séquestration du carbone et fourniture d'autres services écosystémiques des parcs agroforestiers à karité au Burkina Faso

Kangbéni DIMOBE^{1,2}
Jules BAYALA³

¹ Université de Dédougou
Institut des sciences de l'environnement
et du développement rural (ISED)
Département des eaux, forêts
et environnement
BP 176, Dédougou
Burkina Faso

² Université Joseph Ki-Zerbo
UFR-SVT
Laboratoire de biologie et écologie
végétales
03 BP 7023, Ouagadougou
Burkina Faso

³ Center for International Forestry
Research-World Agroforestry
(CIFOR-ICRAF)
06 BP 9478 Ouagadougou 06,
Burkina Faso

**Auteur correspondant /
Corresponding author:**

Kangbéni DIMOBE –
kangbenidimobe@gmail.com



Photo 1.
Parc agroforestier à karité (*Vitellaria paradoxa*).
Shea (Vitellaria paradoxa) agroforestry park.
Photo K. Dimobe, 2021.

Doi : 10.19182/bft2023.356.a36903 – Droit d'auteur © 2023, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 15 novembre 2022 ;
date d'acceptation : 11 avril 2023 ; date de publication : 1er juin 2023.



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

Citer l'article / To cite the article

Dimobe K., Bayala J., 2023. Séquestration du carbone et fourniture d'autres services écosystémiques des parcs agroforestiers à karité au Burkina Faso. Bois et Forêts des Tropiques, 356 : 67-80. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2023.356.a36903>

RÉSUMÉ

Séquestration du carbone et fourniture d'autres services écosystémiques des parcs agroforestiers à karité au Burkina Faso

L'agroforesterie joue un rôle important dans l'atténuation du climat et la fourniture d'autres services écosystémiques. La forme la plus répandue de cette agroforesterie pour l'Afrique de l'Ouest est constituée par les parcs agroforestiers avec du karité (*Vitellaria paradoxa*) comme espèce dominante. En dépit de cette importance, le potentiel de séquestration du carbone des parcs agroforestiers à karité a été très peu documenté au Burkina Faso. La présente étude a pour objectif d'évaluer la contribution des parcs agroforestiers à karité à la séquestration du carbone et autres services écosystémiques dans ce pays. Pour cela, une enquête auprès des ménages et des inventaires ont été réalisés dans trois secteurs phytogéographiques au Burkina Faso. Plus de 89 % des personnes enquêtées ont du karité dans leurs champs. Selon les résultats d'enquêtes, la plante fournit du bois de chauffe et du bois d'œuvre. Elle améliore également la fertilité du sol et intervient dans le contrôle de l'érosion du sol. La densité du karité dans les champs varie entre 32 et 45 individus/ha avec une hauteur moyenne de $7,93 \pm 0,22$ m et un diamètre à hauteur de poitrine (DBH) de $31,9 \pm 1,37$ cm. La biomasse aérienne des individus de *V. paradoxa* présents dans les différents parcs varie entre 15,5 et 42,8 Mg/ha (soit une moyenne de $25,7 \pm 8,1$ Mg/ha ou 12,8 Mg de C/ha). Nos résultats ont donc montré que les parcs agroforestiers à karité contribuent de manière significative à la séquestration du carbone et que l'ampleur de ces bénéfices varie avec le DBH des arbres et les secteurs phytogéographiques. Nous avons constaté que les individus ont tous un DBH supérieur à 24 cm et qu'il n'y a donc pas de jeunes sujets. Il y a par conséquent nécessité de régénération, laquelle peut se faire par régénération naturelle assistée, par plantation ou par une combinaison des deux.

Mots-clés : agrisylviculture, biomasse, carbone, contrôle de l'érosion, climat, Burkina Faso.

ABSTRACT

Carbon sequestration and other ecosystem services provided by shea-tree agroforestry parks in Burkina Faso

Agroforestry plays an important role in climate mitigation and the provision of other ecosystem services. In West Africa, agroforestry is most widespread in the form of parks with shea trees (*Vitellaria paradoxa*) as the dominant species. Despite their important role, the carbon sequestration potential of shea-tree agroforestry parks in Burkina Faso is very poorly documented. This study aims to assess the contribution of shea-tree agroforestry parks to carbon sequestration and other ecosystem services in Burkina Faso. For this purpose, inventories and a survey among households were carried out in three phytogeographical sectors of Burkina Faso. Over 89% of those surveyed had shea trees in their fields. According to the survey results, these trees provide fuelwood and timber as well as improving soil fertility and helping to control soil erosion. Their density in fields varies from 32 to 45 individuals/ha, with an average height of 7.93 ± 0.22 m and a diameter at breast height (DBH) of 31.9 ± 1.37 cm. The above-ground biomass of the *V. paradoxa* individuals present in the different parklands ranged from 15.5 to 42.8 Mg/ha (i.e. an average of 25.7 ± 8.1 Mg/ha or 12.8 Mg of C/ha). Our results therefore show that shea-tree agroforestry parks contribute significantly to carbon sequestration and that the extent of these benefits varies with the DBH of the trees and the phytogeographical sectors. We found that the trees all have a DBH > 24 cm and therefore that there are no young trees. This points to a need for regeneration, which can be achieved by assisted natural regeneration, planting or a combination of the two.

Keywords: agrisylviculture, biomass, carbon, erosion control, climate, Burkina Faso.

RESUMEN

Secuestro de carbono y prestación de otros servicios ecosistémicos por los parques agroforestales de karité en Burkina Faso

La agrosilvicultura desempeña un papel importante en la atenuación del clima y en la prestación de otros servicios ecosistémicos. La forma de agrosilvicultura más extendida en África Occidental son los parques agroforestales con karité (*Vitellaria paradoxa*) como especie dominante. A pesar de esta importancia, el potencial de secuestro de carbono de los parques agroforestales de karité ha sido poco documentado en Burkina Faso. El objetivo de este estudio es evaluar la contribución de los parques agroforestales de karité al secuestro de carbono y a otros servicios ecosistémicos en este país. Para ello, se realizó una encuesta en hogares e inventarios en tres zonas fitogeográficas de Burkina Faso. Más del 89 % de los encuestados tienen karité en sus campos. Según los resultados de la encuesta, la planta proporciona leña y madera para construcción. También mejora la fertilidad del suelo y ayuda a controlar su erosión. La densidad de karité en los campos varía entre 32 y 45 individuos/ha con una altura media de $7,93 \pm 0,22$ m y un diámetro a la altura del pecho (DAP) de $31,9 \pm 1,37$ cm. La biomasa aérea de los individuos de *V. paradoxa* presentes en los distintos parques varía entre 15,5 y 42,8 Mg/ha (es decir, una media de $25,7 \pm 8,1$ Mg/ha o 12,8 Mg de C/ha). Nuestros resultados muestran, por tanto, que los parques agroforestales de karité contribuyen de forma significativa a la captura de carbono y que la magnitud de estos beneficios varía en función del DAP de los árboles y de los sectores fitogeográficos. Comprobamos que todos los individuos tienen un DAP > 24 cm, por lo que no hay sujetos jóvenes. En consecuencia, es necesaria una regeneración, que puede lograrse mediante la regeneración natural asistida, la plantación o una combinación de ambas.

Palabras clave: agroforestería, biomasa, carbono, control de la erosión, clima, Burkina Faso.

Introduction

Le système agricole africain de parcs agroforestiers est devenu une approche bien établie de la gestion intégrée des terres, non seulement pour la production de ressources renouvelables, mais aussi pour des considérations écologiques et environnementales (Bonkougou, 2004 ; Bayala *et al.*, 2014). Il s'agit d'un système traditionnel d'exploitation des terres dans lequel des ligneux pérennes sont délibérément conservés en association avec les cultures (Bonkougou *et al.*, 1994 ; Boffa, 1999). Les parcs agroforestiers ont un grand potentiel couvrant un large éventail de fourniture de produits et de services écosystémiques incluant la biodiversité et constituent de ce fait une stratégie pour une agriculture durable et intelligente face au climat (Blaser *et al.*, 2018). De façon plus large, l'agroforesterie est devenue une stratégie de conservation des ressources naturelles dans les tropiques (Kuyah *et al.*, 2019b) et est mise en œuvre dans bon nombre de pays en Afrique subsaharienne (Boffa, 1999 ; Bayala *et al.*, 2014).

À l'échelle mondiale, les parcs agroforestiers ont un potentiel élevé de stockage du carbone pouvant contribuer à l'atténuation du changement climatique (Mbow *et al.*, 2014b ; Kim *et al.*, 2016) par leur accumulation de biomasse souterraine et aérienne (Cerdeira *et al.*, 2014). Des investigations sur le sujet concernent une revue (Albrecht et Kandji, 2003), une évaluation de différents systèmes agroforestiers (Takimoto *et al.*, 2008), et une simulation (Luedeling et Neufeldt, 2012). Sur la base de ces études passées, il semblerait que l'efficacité des parcs agroforestiers en matière de stockage du carbone dépende des facteurs environnementaux et socio-économiques de chaque région (Mutuo *et al.*, 2005 ; Luedeling et Neufeldt, 2012). En effet, la quantité totale de carbone stockée dépend grandement de la zone d'étude, du type de système agroforestier (nature des composants et âge des arbres), de la qualité du site et de l'utilisation antérieure des terres (Dimobe *et al.*, 2018c). Ainsi, au-delà de la biomasse accumulée en surface, les arbres agroforestiers contribuent à l'augmentation du carbone du sol (biomasse racinaire, litière et élagage), améliorant ainsi la qualité du sol dans les champs et réduisant son érosion (Albrecht et Kandji, 2003 ; Bayala *et al.*, 2006, 2020 ; Kuyah *et al.*, 2016).

Les parcs agroforestiers hétérospécifiques remplissent plusieurs fonctions, tant pour l'environnement que pour les besoins quotidiens des populations locales, y compris la génération de revenus (Mbow *et al.*, 2014b ; Binam *et al.*, 2015 ; Kuyah *et al.*, 2016 ; Dimobe *et al.*, 2018b). Des travaux antérieurs sur les différents parcs à karité au Bénin, Burkina Faso et Togo révèlent que ces derniers sont en dégradation continue du fait des facteurs climatiques, anthropogéniques et des pratiques culturelles non adaptées (Gnangle *et al.*, 2012 ; Kaboré *et al.*, 2012 ; Aleza *et al.*, 2015 ; Ouoba *et al.*, 2020). Cela s'explique par une absence de politique de valorisation de ces parcs et de mise en œuvre de stratégies de conservation efficiente de la diver-

sité spécifique, y compris pour l'espèce dominante de ces systèmes qu'est le karité (*Vitellaria paradoxa* C.F. Gaertn.). Les résultats de cette dégradation font des parcs à karité, à long terme, des sources potentielles d'émission de gaz à effet de serre alors qu'ils devraient normalement constituer des zones de séquestration du carbone, à l'image des zones semi-arides où sont localisés ces systèmes (Poulter *et al.*, 2014 ; Ahlström *et al.*, 2015). Face à cette situation, il est donc nécessaire de développer des stratégies de conservation et de gestion des ressources forestières basées sur des données de leur capacité actuelle de séquestration de carbone.

Vitellaria paradoxa C.F. Gaertn. (Sapotaceae) est une espèce agroforestière (associée à des cultures vivrières) que l'on retrouve dans la zone soudanienne de l'Afrique de l'Ouest (Fischer *et al.*, 2011 ; Dimobe *et al.*, 2020). Préservés dans les systèmes agraires où ils bénéficient des labours et de la protection contre le feu, les arbres deviennent plus vigoureux et plus productifs que les sujets des formations naturelles (Kaboré *et al.*, 2012) (photo 1). *Vitellaria paradoxa* fait partie des espèces végétales autochtones les plus utilisées au Burkina Faso, à cause de son beurre qui est très recherché, car il occupe une place importante dans la vie des populations rurales et dans l'économie de nombreux pays (Sanou *et al.*, 2004 ; Pouliot, 2012). Il s'agit d'une espèce à usages multiples, présente dans la plupart des exploitations agricoles du Burkina Faso, où elle est plantée, ou entretenue via la régénération naturelle assistée par les populations locales. Elle est également présente dans la végétation quasi naturelle, sous forme d'arbres dispersés (Fischer *et al.*, 2011).

Le potentiel de *V. paradoxa* pour la séquestration du carbone est élevé (Sanogo *et al.*, 2016, 2021 ; Dimobe *et al.*, 2018a). Cependant, aucune étude n'a évalué de façon spécifique le potentiel de séquestration du carbone des parcs à *V. paradoxa* au Burkina Faso, même si des informations existent pour des pays voisins (Sanogo *et al.*, 2016, 2021). Les études existantes sur l'espèce pour ce pays se sont focalisées sur la dynamique du karité dans les systèmes agraires (Kaboré *et al.*, 2012), les connaissances et perceptions des producteurs sur la gestion des parcs à *V. paradoxa* (Ouoba *et al.*, 2018), la régénération assistée du karité dans les parcs agroforestiers (Ouoba *et al.*, 2020), et sa productivité fruitière dans les parcs agroforestiers traditionnels (Lamien *et al.*, 2004 ; Bayala *et al.*, 2008). Il est donc essentiel d'évaluer le potentiel du stock de carbone de l'espèce dans les systèmes agroforestiers des petits exploitants dans ce pays. Cette étude vise à évaluer le potentiel de l'agroforesterie basée sur le karité pour la séquestration du carbone et autres services écosystémiques au Burkina Faso.

Matériels et méthodes

Milieu d'étude

Les principaux parcs agroforestiers à karité ont été identifiés à l'issue d'une enquête exploratoire dans trois secteurs phytogéographiques du Burkina Faso (Fontès et Guinko, 1995) : le sub-sahel, le nord-soudanien et le sud-soudanien (figure 1). Les sites d'étude ont été sélectionnés suivant la distribution phytogéographique de l'espèce ainsi que l'abondance de ses individus adultes. Les caractéristiques climatiques et écologiques des secteurs phytogéographiques et des sites concernés par l'étude sont décrites dans le tableau I.

Échantillonnage et collecte des données

Une enquête auprès des ménages a été réalisée entre avril et mai 2021 dans les trois secteurs phytogéographiques (figure 1). La sélection des sites d'étude dans ces secteurs a été effectuée à dessein en raison de la prédominance des individus de *V. paradoxa* dans les parcs agroforestiers. Les

agriculteurs ont été sélectionnés au hasard pour l'entretien à partir de la liste obtenue auprès des chefs communautaires. Au total 129 agriculteurs (40 dans le sub-sahel, 46 dans le nord-soudanien et 43 dans le sud-soudanien) ont été interviewés, pour une marge d'erreur de 6 %, selon la formule de Dagnelie (1998), ce qui est acceptable en statistique. Les ménages sélectionnés ont été interrogés à l'aide de questionnaires d'enquête structurés afin d'obtenir des informations pertinentes pour les objectifs de l'étude. Ces derniers ont exprimé leur consentement libre et éclairé à participer à l'étude. Cependant, avant les entretiens, une pré-enquête a été menée auprès de 10 agriculteurs pour évaluer le questionnaire et, sur la base de ces réponses, quelques modifications mineures y ont été apportées avant de mener l'enquête proprement dite.

À l'issue des enquêtes et de la phase exploratoire, les parcs à karité ont été choisis aléatoirement pour l'installation des placeaux. Au total 84 champs à raison de 28 champs par secteur dont la taille varie entre 2 500 et 28 500 m² ont été retenus. La taille de chaque champ a été déterminée en faisant le tour du champ avec un appareil GPS (*Global Positioning System*) portatif. Les principales données collectées à l'intérieur de chaque champ sont

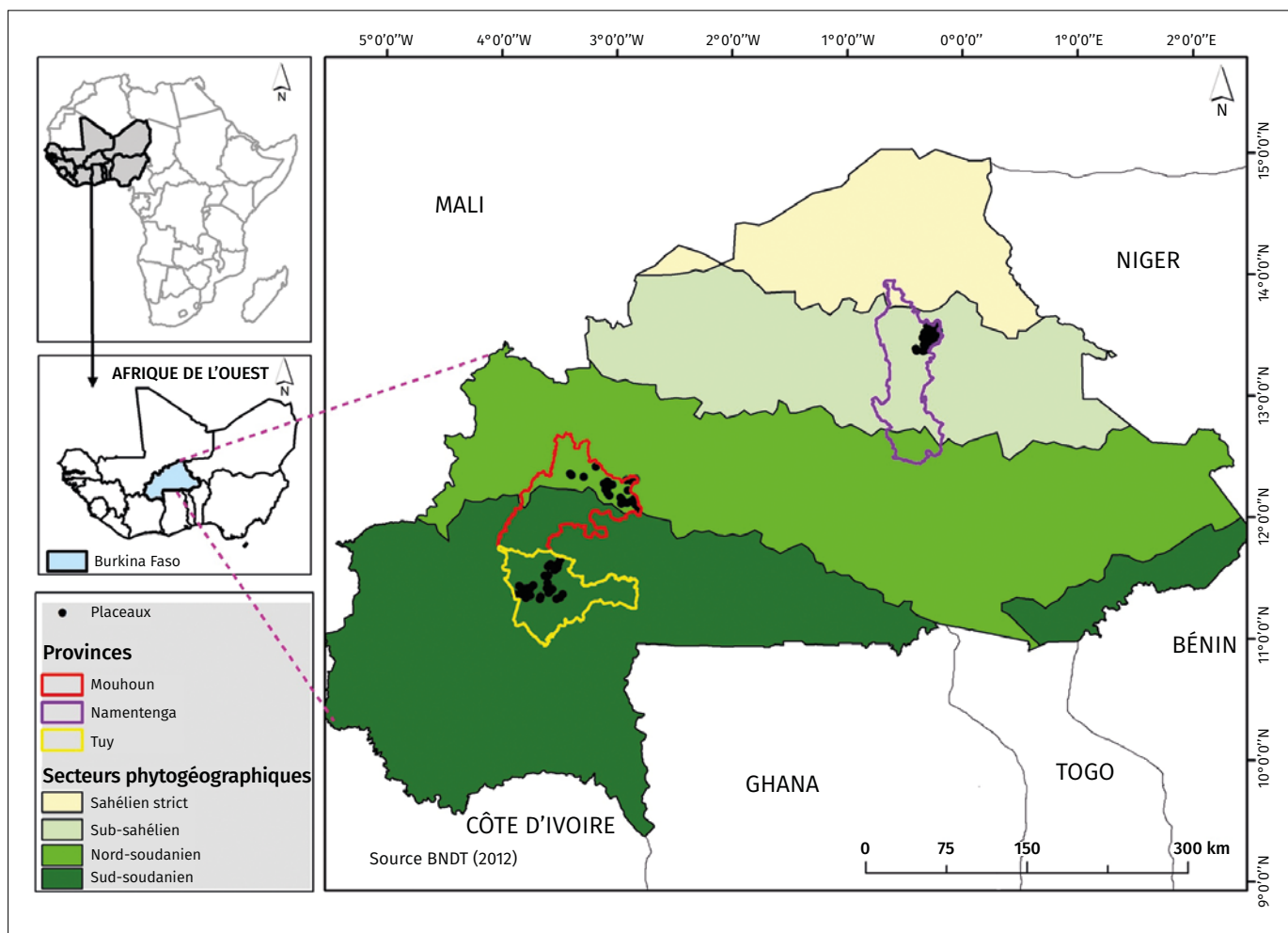


Figure 1. Cartes de localisation des sites d'étude au Burkina Faso et des placeaux installés.
Maps showing the location of the study sites in Burkina Faso and the plots installed.

de deux ordres. D'abord, tous les individus de *V. paradoxa* ayant un diamètre à hauteur de poitrine (DBH) ≥ 5 cm ont été identifiés et leurs DBH à 1,30 m du sol ainsi que leurs hauteurs totales ont été mesurés. La hauteur totale de l'arbre a été mesurée de sa base à la pointe à l'aide d'un clinomètre tandis que le DBH l'a été à l'aide d'un ruban pi. Pour les individus présentant des ramifications en dessous de 1,30 m du sol, chaque ramification a été mesurée à 1,30 m du sol puis la moyenne quadratique de ces mesures a été calculée. Les méthodes décrites par Dietz et Kuyah (2011) ont été utilisées pour maintenir la cohérence dans l'obtention des mesures de diamètre et de hauteur des arbres irréguliers dans les paysages agricoles. Ensuite, pour éviter les biais

et tenir compte de la diversité biologique, le diamètre du houppier a été mesuré deux fois, dans la direction est-ouest et dans la direction nord-sud (Meyer *et al.*, 2014). Les coordonnées géographiques des placeaux d'inventaire ont été enregistrées à l'aide du GPS.

Traitement et analyse des données

L'analyse des données a été assurée à trois niveaux : les paramètres dendrométriques dont la densité, le diamètre moyen, la surface terrière et la hauteur moyenne (tableau II) ; le calcul de la biomasse et du stock de carbone ; l'influence du gradient phytogéographique sur le stock de

Tableau I.

Caractéristiques climatiques et écologiques des secteurs phytogéographiques concernés par l'étude de la séquestration du carbone du karité (*Vitellaria paradoxa*) au Burkina Faso.
Climatic and ecological characteristics of the phytogeographical sectors considered in the study of carbon sequestration in shea (Vitellaria paradoxa) in Burkina Faso.

Secteurs	Pluviométrie moyenne (mm)	Température moyenne (°C)	Type de végétation	Espèces caractéristiques
Sub-sahel	798,17	30,52	Cordons ripicoles, steppes arbustives et arborées	<i>Mitragyna inermis</i> , <i>Diospyros mespiliformis</i> , <i>Lansea microcarpa</i> , <i>Vachellia seyal</i> , <i>Boswellia dalzielii</i>
Nord-soudanien	875,90	29,43	Forêts-galeries et savanes (boisées, arborées et arbustives)	<i>Pterocarpus santalinoides</i> , <i>Mitragyna inermis</i> , <i>Vitellaria paradoxa</i> , <i>Anogeisus leiocarpa</i>
Sud-soudanien	1 144,55	28,15	Forêts-galeries, forêts claires et savanes (boisées, arborées et arbustives)	<i>Berlinia grandiflora</i> , <i>Khaya senegalensis</i> , <i>Elaeis guineensis</i> , <i>Ixora brachypoda</i> , <i>Isobertinia doka</i> , <i>Vitellaria paradoxa</i> , <i>Anogeisus leiocarpa</i> , <i>Cola cordifolia</i>

Source des données climatiques : Direction générale de l'aviation civile et de la météorologie (période : 2013-2016).

Tableau II.

Description des paramètres dendrométriques calculés.
Description of the dendrometric parameters calculated.

Paramètres (unité)	Formule	Interprétation
Densité (individus/ha)	$N = \frac{n}{s}$	Nombre moyen d'arbres par hectare ; n étant le nombre total d'individus et s la taille du placeau en ha.
Diamètre moyen (cm)	$Dm = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2}$	Diamètre quadratique moyen en centimètre ; n étant le nombre total d'individus du placeau et d_i le DBH de l'individu i .
Surface terrière (m ² /ha)	$G_o = \frac{\pi}{4000s} \sum_{i=1}^n d_i^2$	Somme des sections transversales des individus adultes.
Hauteur moyenne de Lorey (m)	$H_L = \frac{\sum_{i=1}^n g_i h_i}{\sum_{i=1}^n g_i}$ Avec $g_i = \frac{\pi}{4} d_i^2$	Hauteur moyenne des individus adultes d'un placeau pondérée par leur surface terrière qui représente la hauteur de la canopée ; g_i est la surface terrière ; h_i est la hauteur totale de l'individu i .

DBH : diamètre à hauteur de poitrine.

carbone. Le diamètre moyen est le diamètre quadratique moyen qui représente le diamètre de l'arbre de surface terrière moyenne. La hauteur moyenne est la hauteur de Lorey, soit la hauteur pondérée par la surface terrière. La biomasse et le stock de carbone ont été calculés pour tous les individus de *V. paradoxa* inventoriés dans les parcs. Le diamètre des tiges a été converti en surface de section transversale à hauteur de poitrine pour obtenir la surface terrière des arbres (Torres et Lovett, 2013). Ces évaluations ont été conduites suivant les secteurs phytogéographiques.

Les données ont été passées au crible pour les nettoyer, identifier les valeurs aberrantes et tester leur normalité. Des statistiques descriptives (moyennes et erreurs standards, SE) pour les variables dendrométriques, la biomasse et le stock de carbone ont été calculées pour tous les arbres inventoriés (*i.e.* tous les individus de *V. paradoxa*).

Les équations allométriques développées par Dimobe *et al.* (2018a) ont été utilisées pour estimer la biomasse aérienne (AGB) des arbres (individus de *V. paradoxa*) de l'inventaire. La biomasse souterraine (BS) a été calculée comme une fraction (25 %) de la biomasse aérienne (Taki-moto *et al.*, 2008). La biomasse totale (BT) a été obtenue comme la somme de la biomasse aérienne et souterraine. Le stock de carbone a été calculé en multipliant la somme de la BT par une fraction de carbone de 0,5 (Smith *et al.*, 2014) selon la formule suivante :

$$\text{Carbone} = \text{BT} * 0,5$$

La quantité de CO₂ séquestrée dans la biomasse aérienne a été estimée en multipliant le poids du carbone dans les arbres par le rapport entre le CO₂ et le C (44/12 = 3,67). Pour évaluer l'influence du gradient phytogéographique et des paramètres structurels (densité et surface terrière) sur le carbone, trois classes de diamètre ont été considérées : la classe de diamètre de petite taille (DBH < 20 cm), de taille moyenne (20 ≤ DBH ≤ 40 cm) et de grande taille (DBH > 40 cm). Ces classes ont été définies

en tenant compte de la variation de diamètre des arbres de la zone d'étude. Des régressions linéaires multiples ont été utilisées pour évaluer comment le carbone stocké par le peuplement de karité est influencé par les variables structurelles (densité et surface terrière) dans les trois classes de diamètre. En outre, nous avons calculé les variables structurelles à l'échelle du plateau pour chaque classe de taille, c'est-à-dire pour tous les arbres appartenant aux classes de diamètre < 20 cm, 20-40 cm et > 40 cm. Ainsi, un total de six variables structurelles quantitatives a été considéré pour chaque secteur phytogéographique dans les analyses ultérieures, à savoir la densité des arbres pour les classes de petite, moyenne et grande taille, et la surface terrière pour les classes de petite, moyenne et grande taille. Les valeurs moyennes des paramètres dendrométriques ont été calculées pour chaque secteur phytogéographique considérée. Une analyse de variance (ANOVA) a été appliquée sur les valeurs log-normalisées de ces moyennes afin de tester l'effet du secteur phytogéographique sur les paramètres dendrométriques des parcs agroforestiers. Toutes les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R version 4.0.2.

Résultats

Diversité floristique, usages et services écosystémiques de *Vitellaria paradoxa*

Les résultats ont révélé une diversité limitée d'espèces ligneuses (arbres et arbustes) dans les parcs agroforestiers étudiés. Au total, 45 espèces ligneuses réparties en 38 genres et 20 familles ont été recensées dans les parcs agroforestiers à karité. Les espèces compagnes de *V. paradoxa* au sein des différents secteurs phytogéographiques sont principalement *Anacardium occidentale* L. [cult.], *Anogeissus leiocarpa* (DC.) Guill. & Perr, *Faidherbia albida* (Delile)

Tableau III.

Caractéristiques des parcs agroforestiers à karité (*Vitellaria paradoxa*) en fonction des secteurs phytogéographiques du Burkina Faso.

Characteristics of shea (Vitellaria paradoxa) agroforestry parks according to the phytogeographical sectors of Burkina Faso.

Secteurs	Les six principales espèces dominantes	Familles les plus représentées
Sub-sahel	<i>Anacardium occidentale</i> L. [cult.] (8,61 %), <i>Parkia biglobosa</i> (Jacq.) R. Br. ex G. Don (8,28 %), <i>Azadirachta indica</i> A. Juss. [cult.] (6,95 %), <i>Daniellia oliveri</i> (Rolf) Hutch. & Dalziel (5,63 %), <i>Lannea microcarpa</i> Engl. & K. Krause (1,70 %), <i>Sterculia setigera</i> Delile (1,65 %)	Anacardiaceae (10,26 %), Fabaceae-Mimosoidae (9,27 %), Meliaceae (7,95 %), Fabaceae-Caesalpinziaceae (7,61 %), Combretaceae (1,98 %)
Nord-soudanien	<i>Parkia biglobosa</i> (Jacq.) R. Br. ex G. Don (14,54 %), <i>Faidherbia albida</i> (Delile) A. Chev. (3,52 %), <i>Azadirachta indica</i> A. Juss. [cult.] (2,64 %), <i>Terminalia laxiflora</i> Engl. & Diels (2,64 %), <i>Detarium microcarpum</i> Guill. & Perr. (2,20 %), <i>Piliostigma thonningii</i> (Schumach.) Milne-Redh. (2,20 %)	Fabaceae-Mimosoidae (18,06 %), Fabaceae-Caesalpinziaceae (11,89 %), Anacardiaceae (3,52 %), Combretaceae (2,64 %), Meliaceae (2,64 %)
Sud-soudanien	<i>Khaya senegalensis</i> (Desr.) A. Juss. (4,80 %), <i>Lannea microcarpa</i> Engl. & K. Krause (4,43 %), <i>Parkia biglobosa</i> (Jacq.) R. Br. ex G. Don (3,70 %), <i>Diospyros mespiliformis</i> Hochst. ex A. DC. (3,32 %), <i>Azadirachta indica</i> A. Juss. [cult.] (2,21 %), <i>Anogeissus leiocarpa</i> (DC.) Guill. & Perr. (0,73 %)	Meliaceae (7,01 %), Fabaceae-Mimosoidae (4,79 %), Anacardiaceae (4,42 %), Ebenaceae (3,32 %), Combretaceae (1,48 %)

A. Chev., *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss., *Lannea microcarpa* Engl. & K. Krause et *Parkia biglobosa* (Jacq.) R. Br. ex G. Don (tableau III). Les familles les plus représentées sont les Anacardiaceae (10,26 % dans le sub-sahélien, 3,52 % dans le nord-soudanien et 4,42 % dans le sud-soudanien), les Fabaceae-Mimosoideae (9,27 % dans le sub-sahélien, 18,06 % dans le nord-soudanien et 4,79 % dans le sud-soudanien), les Fabaceae-Caesalpinioideae (9,27 % dans le sub-sahélien et 11,89 % dans le nord-soudanien) et les Meliaceae (7,95 % dans le sub-sahélien, 2,64 % dans le nord-soudanien et 7,01 % dans le sud-soudanien) (tableau III).

Plus de 89 % des personnes enquêtées ont déclaré que *V. paradoxa* est l'espèce la plus abondante dans leurs exploitations, suivie de *P. biglobosa* (39 %), *L. acida* (12 %), *Detarium microcarpum* (9 %) et *Anogeisus leiocarpa* (7 %). Les autres espèces ligneuses mentionnées occasionnellement sont *Mangifera indica*, *Saba senegalensis*, *Crossopteryx febrifuga*, *Vachellia macrostachya*, *Pterocarpus erinaceus*, *Bombax costatum* et *K. senegalensis*.

La majorité des agriculteurs interrogés (76,9 %) pratique l'agrosylviculture ou l'intégration d'arbres fruitiers ou forestiers dans les cultures agricoles, tandis que 20,7 % d'entre eux pratiquent l'agrosylvopastoralisme ou l'inté-

gration des arbres forestiers dans les cultures agricoles et l'élevage. Dans les exploitations étudiées, les arbres étaient principalement dispersés (73,6 %). Les agriculteurs ont énuméré dix principaux usages de *V. paradoxa* (figure 2). L'alimentation, la pharmacopée, l'amélioration de la fertilité du sol, l'utilisation dans le contrôle de l'érosion du sol, l'utilisation comme bois de feu et le fourrage sont les principales raisons qui poussent les agriculteurs à conserver les individus de l'espèce dans leurs champs (figure 2).

Paramètres dendrométriques des individus de *Vitellaria paradoxa* pour l'estimation de la biomasse

Un total de 801 individus (soit 227 dans le sub-sahel, 272 dans le nord-soudanien et 302 dans le sud-soudanien) a été mesuré sur une surface de 104,5 ha couvrant 84 parcs à *V. paradoxa*. Les statistiques descriptives des variables de l'inventaire sont résumées dans le tableau IV. Le nombre de *V. paradoxa* par parc variait de 5 à 31 tandis que la densité des arbres était comprise entre 32 et 45 individus/ha. Dans l'ensemble du paysage, le diamètre moyen des arbres inventoriés variait entre 24,89 et 37,23 cm, tandis que la hauteur moyenne des arbres était comprise entre

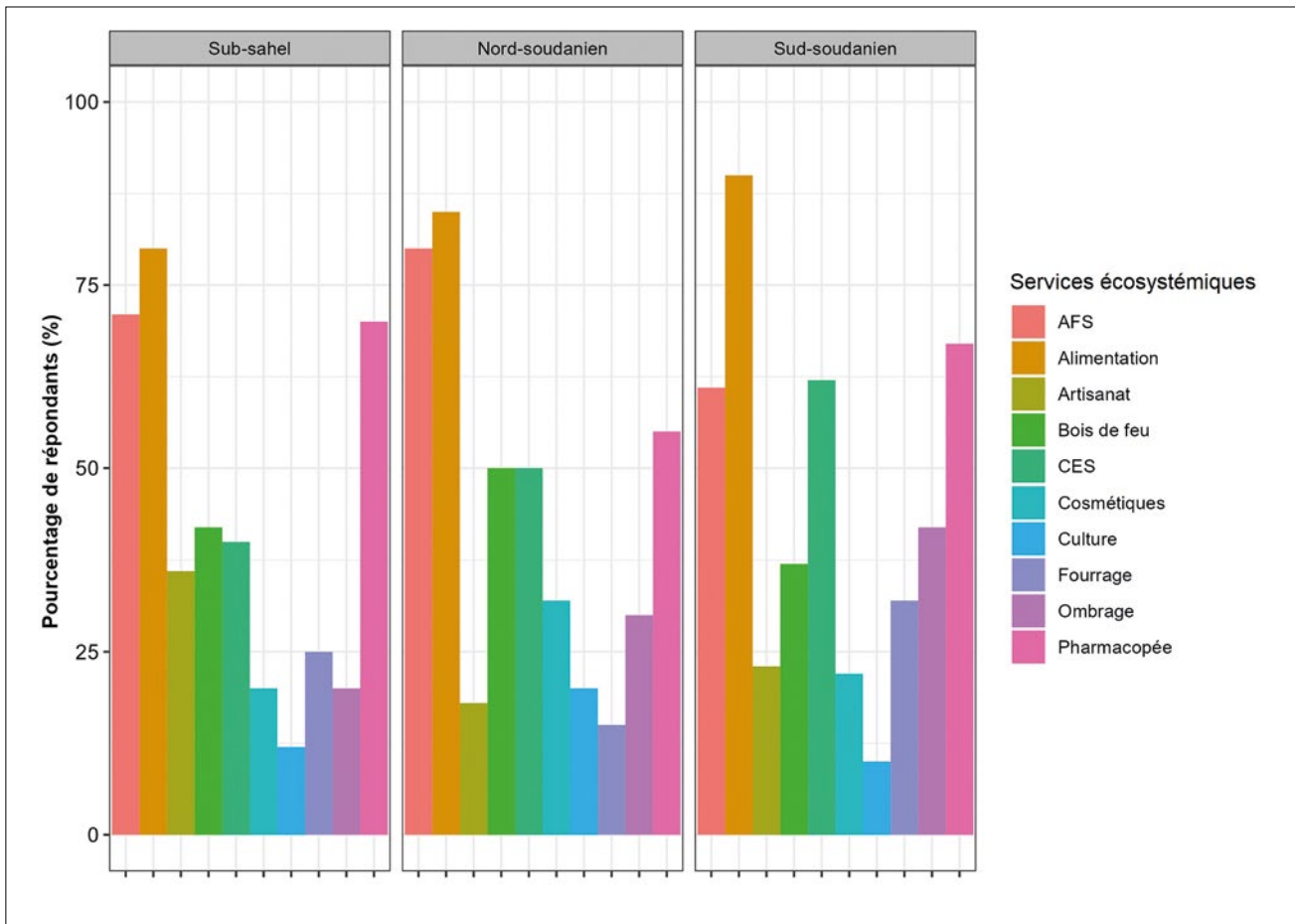


Figure 2.

Quelques services écosystémiques fournis par *Vitellaria paradoxa* dans les trois secteurs phytogéographiques du Burkina Faso. AFS : amélioration de la fertilité du sol ; CES : contrôle de l'érosion du sol.

Some ecosystem services provided by *Vitellaria paradoxa* in the three phytogeographical sectors of Burkina Faso. AFS: Improvement of soil fertility; CES: Soil erosion control.

Tableau IV.

Moyenne et erreur-type des paramètres dendrométriques des individus de *Vitellaria paradoxa* en fonction des secteurs phytogéographiques du Burkina Faso.

*Mean and standard error of the dendrometric parameters of individuals of *Vitellaria paradoxa* according to the phytogeographical sectors of Burkina Faso.*

Paramètres	Sub-sahel	Nord-soudanien	Sud-soudanien
Densité (individus/ha)	32,43 ± 5,14a	44,74 ± 7,16a	38,71 ± 5,16a
Hauteur moyenne (m)	7,93 ± 0,22a	6,91 ± 0,26b	8,58 ± 0,27a
Diamètre moyen (cm)	31,90 ± 1,37b	24,89 ± 0,91c	37,23 ± 1,94a
Surface terrière (m²/ha)	0,45 ± 0,04b	0,27 ± 0,02b	0,76 ± 0,108a
AGB (Mg/ha)	18,42 ± 2,29b	15,52 ± 2,28b	42,80 ± 13,9a
BGB (Mg/ha)	4,61 ± 0,57a	3,88 ± 0,57a	10,69 ± 3,48a

Sur la même ligne, les moyennes avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %. AGB : biomasse aérienne ; BGB : biomasse souterraine.

6,91 et 8,58 m. Lorsque les secteurs ont été comparés, le sud-soudanien présentait des arbres significativement plus gros (37,23 ± 1,94 cm) et plus grands (8,58 ± 0,27 m) par rapport aux deux autres zones (p < 0,001). Cependant, une densité d'arbres plus élevée mais selon une différence non significative a été trouvée dans le nord-soudanien (44,74 ± 7,16 individus/ha). La surface terrière variait selon les secteurs phytogéographiques, allant de 0,27 à 0,76 m²/ha. La biomasse aérienne des individus de *V. paradoxa* présents dans les parcs variait entre 15,52 et 42,8 Mg/ha (soit une moyenne de 25,69 Mg/ha ou 12,85 Mg de carbone (C) par hectare). En revanche, la biomasse souterraine de ces individus variait de 3,88 à 10,69 Mg/ha, avec une moyenne de 6,42 Mg/ha, soit environ 3,21 Mg C/ha.

La biomasse totale (aérienne et souterraine) des parcs agroforestiers à karité a été estimée à 15,53 Mg/ha (soit un stock de carbone de 7,76 Mg C/ha ou 28,49 Mg CO₂ eq/ha), 23,03 Mg/ha (soit un stock de carbone de 11,51 Mg C/ha ou 42,25 Mg CO₂ eq/ha), 49,58 Mg/ha (soit un stock de carbone de 24,79 Mg C/ha ou 90,97 Mg CO₂ eq/ha) dans le sub-sahel, nord-soudanien et sud-soudanien, respectivement. En outre, nous avons trouvé des effets significatifs de l'interaction entre les paramètres structurels par secteur phytogéographique (p < 0,001 ; tableau V). Les résultats suggèrent que le stock de carbone de *V. paradoxa*, selon les secteurs phytogéographiques, dépend des différents attributs structurels (la densité des arbres, la surface terrière et

Tableau V.

Résultats des analyses de régressions linéaires multiples intégrées par classe de diamètre des effets des attributs structurels sur le carbone de *Vitellaria paradoxa* dans les trois secteurs phytogéographiques du Burkina Faso.

*Results of integrated multiple linear regression analyses by diameter class of the effects of structural attributes on the carbon of *Vitellaria paradoxa* in the three phytogeographical sectors of Burkina Faso.*

Paramètres structurels	Sub-sahel			Nord-soudanien			Sud-soudanien		
	Est	t	P	Est	t	P	Est	t	P
Intercept	8,48	7,12	< 0,001	10,86	7,49	< 0,001	6,65	9,31	< 0,001
Densité des arbres dans la petite classe de diamètre (< 20 cm)	- 0,53	- 1,80	0,095	- 0,98	- 4,42	0,0069	- 0,04	- 0,24	0,81629
Surface terrière dans la petite classe de diamètre (< 20 cm)	1,59	5,31	0,061	2,16	10,64	< 0,001	1,07	7,06	0,101
Intercept	7,24	8,63	< 0,001	13,03	3,94	0,002	7,10	15,15	< 0,001
Densité des arbres dans la moyenne classe de diamètre (20-40 cm)	- 0,23	- 0,78	0,444	- 1,39	- 2,51	0,026	- 0,17	- 1,01	0,33
Surface terrière dans la moyenne classe de diamètre (20-40 cm)	1,33	5,11	< 0,001	2,44	4,44	0,0731	1,11	6,85	< 0,001
Intercept	7,33	11,94	< 0,001	11,00	10,14	< 0,001	7,34	18,50	< 0,001
Densité des arbres dans la grande classe de diamètre (> 40 cm)	- 0,28	- 0,78	0,429	- 1,13	- 5,63	< 0,001	- 0,34	- 1,56	0,014
Surface terrière dans la grande classe de diamètre (> 40 cm)	1,39	4,65	< 0,001	2,03	10,08	< 0,001	1,22	7,32	< 0,001

Est : estimation ; t : valeur du test ; P : valeur de la probabilité.

les classes de diamètre) du peuplement. Seule la densité de gros arbres importe pour le stock de carbone dans les secteurs nord- et sud-soudanien ($p < 0,05$; tableau V). Comme attendu, pour les trois secteurs phytogéographiques, la densité des arbres était significativement plus élevée dans les classes de petite et moyenne taille que dans la classe de grande taille (figure 3). La zone sub-sahélienne a présenté la plus faible densité (par rapport aux zones nord-soudanienne et sud-soudanienne) dans la classe de petite taille, mais a recouvert des valeurs significativement élevées pour ce paramètre dans les classes de moyenne et grande taille (figure 3). Comme on s’y attendait également, pour les trois secteurs phytogéographiques, les classes de taille moyenne ($20 \text{ cm} \leq \text{DBH} \leq 40 \text{ cm}$) et grande ($\text{DBH} > 40 \text{ cm}$) présentent les valeurs les plus élevées de surface terrière et de carbone. Les modèles d’interaction entre les secteurs phytogéographiques et les classes de taille observés pour la surface terrière et le carbone étaient similaires à ceux de la densité des arbres : la zone sub-sahélienne présentait significativement la surface terrière et le carbone les plus faibles dans la classe des petites tailles par rapport aux secteurs nord-soudanien et sud-soudanien, mais des valeurs significativement plus élevées dans les classes des moyennes et grandes tailles (figure 3, tableau V).

Discussion

Le karité (*V. paradoxa*) est une espèce très appréciée pour la matière grasse tirée de ses amandes et est citée parmi les ligneux les plus préservés dans les parcs agroforestiers des zones semi-arides de l’Afrique subsaharienne du Sénégal à l’Ouganda (Lovett et Haq, 2000). Kaboré *et al.* (2012) rapportent qu’elle est l’espèce préférée des paysans de la zone soudanienne du Burkina Faso du fait de l’importance des ressources financières générées par la vente de ses amandes. Dans la présente étude, nous avons investigué l’importance des parcs agroforestiers à karité dans le stockage du carbone et autres services écosystémiques. Les résultats ont montré que la plupart des agriculteurs citent l’alimentation comme la principale raison de protéger l’espèce dans les parcs agroforestiers au Burkina Faso. Des études antérieures ont abouti à des conclusions similaires sur l’importance socio-économique de cette espèce en Afrique de l’Ouest (Lamien *et al.*, 2004 ; Pouliot, 2012 ; Bondé, 2019). Les travaux de Dimobe *et al.* (2018c) au centre-sud du Burkina Faso ont révélé que les femmes apprécient beaucoup les noix de *V. paradoxa* pour leur forte teneur en

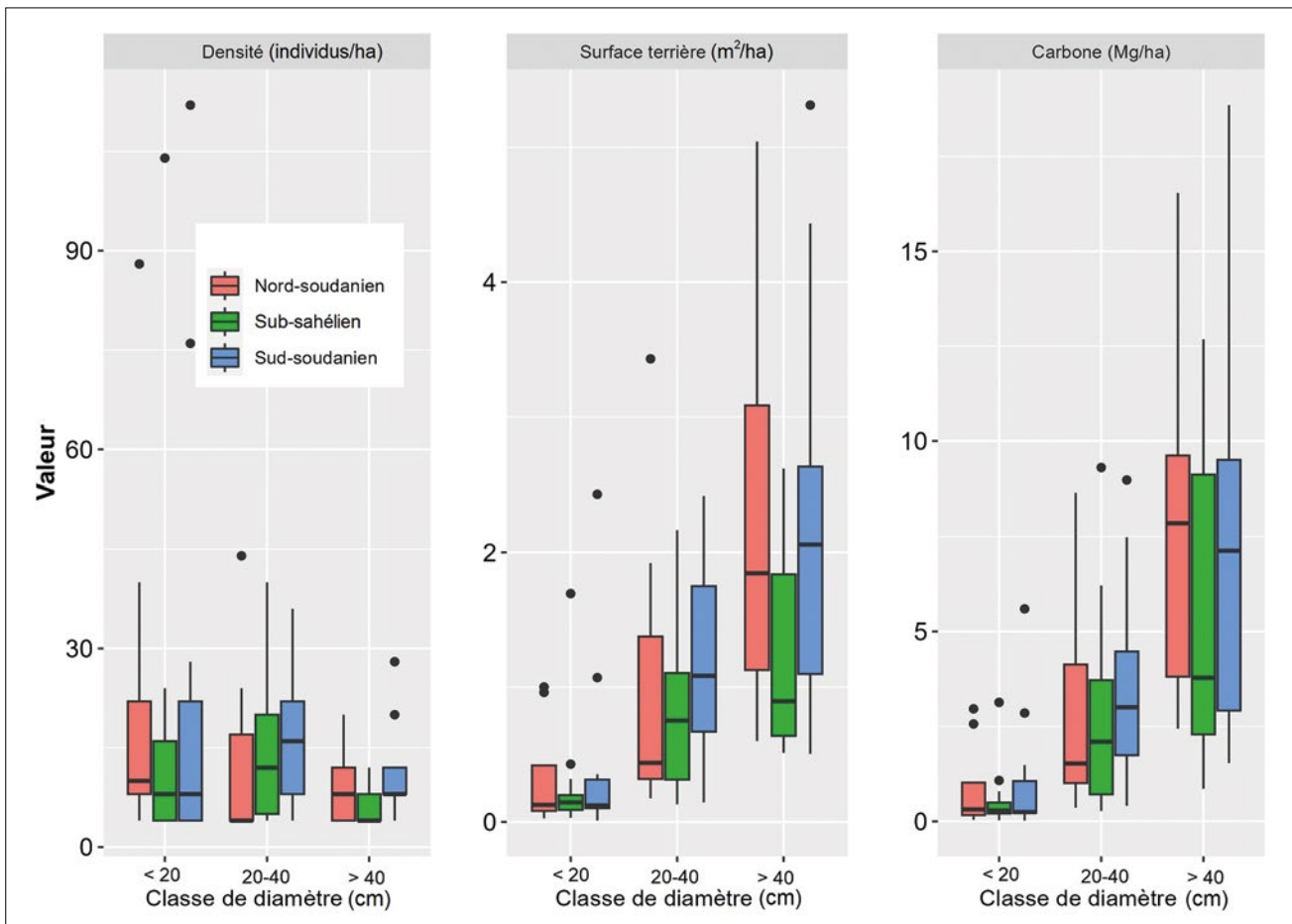


Figure 3.

Variation de la densité, de la surface terrière et du carbone de *Vitellaria paradoxa* entre les classes de diamètre et les secteurs phytogéographiques au Burkina Faso.

Variation in density, basal area and carbon of *Vitellaria paradoxa* between diameter classes and phytogeographical sectors in Burkina Faso.

huile. L'enregistrement de « pharmacopée » (96 %) comme fonction ou service supplémentaire indique que les agriculteurs connaissent les arbres pour leurs propriétés nutritionnelles et sanitaires (Kinda *et al.*, 2017 ; Ojo *et al.*, 2021). La dépendance des agriculteurs à l'égard de médicaments à base de plantes plus accessibles et plus abordables pour les soins de santé illustre bien les défis majeurs que représentent les soins de santé au Burkina Faso (Nicolas, 2018 ; Zizka *et al.*, 2015). Les agriculteurs reconnaissent également les individus de *V. paradoxa* pour les bénéfices environnementaux tels que le contrôle de l'érosion des sols, l'ombrage et l'amélioration de leur fertilité (Bayala *et al.*, 2014).

Les individus de *V. paradoxa* améliorent la fertilité des sols de plusieurs façons. Tout d'abord, les feuilles et les fruits tombés de l'arbre fournissent une source importante de matière organique qui est décomposée par les micro-organismes du sol, ce qui contribue à augmenter la teneur en matière organique du sol (MOS). En outre, les racines fines se décomposent afin de permettre leur renouvellement au cours des cycles phénologiques synchronisés des feuilles et racines fines (Bazié *et al.*, 2019). Cette décomposition contribue à augmenter la MOS et les autres éléments nutritifs. Enfin, les racines de l'espèce peuvent contribuer à l'amélioration de l'agrégation du sol en créant des canaux pour l'infiltration de l'eau et en favorisant la formation de micro-agrégats (Bargués-Tobella *et al.*, 2020). Cette agrégation accrue peut améliorer la porosité et la perméabilité du sol, ce qui favorise la croissance des plantes et la circulation de l'air et de l'eau dans le sol (Bargués Tobella *et al.*, 2014 ; Ilstedt *et al.*, 2016). Ces services écosystémiques sont liés au désir des agriculteurs d'accroître le rendement des cultures via l'amélioration de la fertilité des sols (Ndoli *et al.*, 2017), la régulation du climat et le contrôle de l'érosion des sols (van Noordwijk *et al.*, 2014 ; Kuyah *et al.*, 2019a). La domestication d'espèces indigènes comme le karité est l'un des moyens d'augmenter l'approvisionnement en biens et services qui ne peuvent plus être obtenus à l'état sauvage (Ræbild *et al.*, 2011 ; Boffa, 2015 ; Leakey *et al.*, 2022).

Les résultats révèlent également que la biomasse totale de *V. paradoxa* dans les parcs agroforestiers varie en fonction de la taille (DBH) des arbres. Il a été observé que la classe de diamètre > 40 cm présentait la plus grande proportion de la quantité de carbone dans les trois secteurs phytogéographiques. Ces résultats peuvent s'expliquer par la surface terrière plus importante dans cette classe de diamètre (figure 3). Ces résultats corroborent des travaux antérieurs, qui ont montré que le stock de carbone des espèces ligneuses est intimement lié au DBH et à la densité des arbres (Chabi *et al.*, 2016 ; Dimobe *et al.*, 2018b). Ils sont aussi conformes à la théorie de l'échelle métabolique qui prédit que le taux de croissance de la masse d'un arbre devrait augmenter de façon continue avec la taille et l'âge de l'arbre (Enquist *et al.*, 1999). Cependant, le maintien des individus de *V. paradoxa* jusqu'à un âge avancé dans les parcs agroforestiers pourrait ne pas être une tâche facile compte tenu de la pression des agriculteurs sur les arbres pour satisfaire leurs besoins en produits arboricoles tels que le bois de chauffe pour la cuisine et le bois de construction (Mononen et Pitkänen, 2016 ; Gaisberger *et al.*, 2017). Par

conséquent, l'attention doit être portée à l'amélioration des connaissances des agriculteurs sur les pratiques de gestion des arbres agroforestiers afin d'améliorer la croissance des arbres et la productivité de la biomasse. De plus, *V. paradoxa* étant l'espèce agroforestière la plus abondante dans la zone d'étude, il est nécessaire de diversifier les espèces ligneuses afin de réduire la pression des agriculteurs sur les individus de *V. paradoxa* et de les maintenir à long terme dans les champs. Le potentiel de ces parcs à stocker le carbone est un bon signe et une opportunité pour la mise en œuvre de l'initiative REDD+, car l'un des objectifs de cette dernière est de promouvoir la gestion durable des terres et la conservation du carbone sur le long terme, et par là de répondre également aux contributions déterminées au niveau national (CDN) (Arevalo, 2016 ; Tanyi *et al.*, 2018).

Les résultats sur le potentiel de stockage de carbone des parcs agroforestiers indiquent que les individus de *V. paradoxa* stockent une quantité substantielle de carbone dans leur biomasse aérienne (12,85 Mg C/ha). Cette quantité de carbone se situe dans la fourchette de stock de carbone de 7 à 28 Mg C/ha rapportée pour les systèmes agroforestiers de l'Afrique subsaharienne (Cyamweshi *et al.*, 2021). Cependant, ces valeurs demeurent inférieures à celles relevées dans le système agroforestier de l'Afrique tropicale humide (29 à 53 Mg C/ha) (Albrecht et Kandji, 2003) et dans les systèmes agroforestiers traditionnels des tropiques (145 Mg C/ha) (Kirby et Potvin, 2007). En évaluant les stocks de carbone de divers systèmes agroforestiers, Takimoto *et al.* (2008) ont trouvé des stocks de carbone aérien allant de 0,7 à 54,0 Mg C/ha et un stock de carbone total (carbone aérien et carbone du sol) de 28,7 à 87,3 Mg C/ha. Les stocks de carbone obtenus par simulation selon 19 scénarios climatiques dans les terres productives sahéliennes seraient d'environ 1,284 Tg contre 725 Tg dans un scénario sans arbres, selon Luedeling et Neufeldt (2012). Les résultats de l'étude ont mis en évidence une estimation de la quantité de carbone souterrain dans les parcs agroforestiers, qui s'élève à 3,21 Mg C/ha. Cette valeur est inférieure à la fourchette de stock de carbone observée dans les systèmes agroforestiers en Afrique subsaharienne, qui varie de 5,7 à 70,8 Mg C/ha (Mbow *et al.*, 2014a). Une différence qui peut s'expliquer par le fait d'avoir considéré seulement les individus du karité et non ceux de toutes les espèces. Plusieurs autres facteurs tels que le climat, le type de sol, les pratiques de gestion peuvent aussi être à l'origine des différences observées. Toutefois, ces résultats sont importants car ils démontrent le potentiel des systèmes agroforestiers comme puits de carbone et soulignent la nécessité de poursuivre les recherches afin de mieux comprendre le rôle du carbone souterrain dans le stockage du carbone dans ces systèmes.

Les relations entre le stock de carbone et les attributs structurels (densité et surface terrière) ont révélé des modèles et des contrastes importants entre les classes de diamètre et les secteurs phytogéographiques. Dans l'ensemble des secteurs phytogéographiques, nous avons constaté que la densité (surtout pour les arbres de moyen et gros diamètre) et la surface terrière des individus de grande taille (DBH > 40 cm) ont positivement et de façon

significative influencé le stock de carbone. Des tendances similaires ont été observées dans la classe de diamètre moyenne (*i. e.* 20-40 cm), mais dans le sub-sahel et le sud-soudanien uniquement, tandis que les attributs structurels des arbres de petite taille (DBH < 20 cm) n'ont pas influencé le stock de carbone dans l'ensemble des trois secteurs phytogéographiques. Ces résultats reflètent les effets plus importants des arbres de grande taille (c'est-à-dire DBH > 40 cm et $20 \leq \text{DBH} \leq 40$ cm) sur le stock de carbone, qui peuvent découler des effets de dominance (c'est-à-dire des contraintes concurrentielles), suggérant ainsi que l'effet de sélection est un mécanisme opérant dans ces parcs agroforestiers (Van Pelt *et al.*, 2016).

Parmi les trois secteurs phytogéographiques, le sud-soudanien se caractérise par une densité supérieure en arbres de grande taille ($8,58 \pm 0,27$ m) et de diamètre élevé ($37,23 \pm 1,94$ cm) par rapport aux secteurs sub-sahélien et nord-soudanien. Cette particularité se traduit par une surface terrière et un stock de carbone plus élevés. Inversement, les secteurs sub-sahélien et nord-soudanien présentaient des stocks de carbone plus importants dans la classe des petites tailles que le secteur sud-soudanien. Ces résultats suggèrent que l'accumulation de biomasse dans les classes de diamètre varie selon les secteurs phytogéographiques (Mensah *et al.*, 2020). Deux raisons principales pourraient expliquer les effets différentiels observés de la classe de taille sur le stock de carbone entre les secteurs phytogéographiques : la disponibilité des ressources et le mode de croissance de l'espèce. D'une part, le stock de carbone plus élevé et la plus grande densité d'arbres associée dans les classes de taille supérieure dans le secteur sud-soudanien peuvent être attribués aux meilleures conditions climatiques de croissance des plantes, par exemple à une plus grande disponibilité en eau et en nutriments. En revanche, le stock de carbone plus élevé dans la petite classe de diamètre dans les secteurs sub-sahélien et nord-soudanien, par rapport à la même classe dans le sud-soudanien, résulte probablement de la plus grande abondance d'individus de petit diamètre. De surcroît, les conditions climatiques défavorables de sécheresse et de faible humidité du sol dans les secteurs sub-sahélien et nord-soudanien peuvent limiter la prévalence des arbres de grande taille et favoriser les arbres de petite taille. En effet, les arbres de grande taille seraient plus sensibles à la mortalité due à la sécheresse que les arbres de petite taille (Bennett *et al.*, 2015).

Conclusion

La présente étude a examiné le potentiel de séquestration du carbone et autres services écosystémiques de *Vitellaria paradoxa*, le karité, dans les parcs agroforestiers suivant trois secteurs phytogéographiques (sub-sahélien, nord-soudanien, sud-soudanien) au Burkina Faso. Les principaux résultats montrent que les systèmes agroforestiers étudiés emmagasinent une quantité importante de carbone, soit 7,76 Mg C/ha, 11,51 Mg C/ha, 24,79 Mg C/ha dans le sub-sahélien, nord-soudanien et sud-soudanien, respectivement. Ils confirment l'énorme potentiel des

parcs à karité dans le stockage du carbone. Les résultats montrent également l'influence significative des secteurs phytogéographiques sur les paramètres dendrométriques et le carbone. En outre, l'espèce est utilisée dans divers domaines et fournit des services précieux (alimentation, bois d'œuvre, contrôle de l'érosion du sol et amélioration de la fertilité du sol) tant pour l'amélioration des moyens de subsistance que pour des avantages environnementaux. Les politiques de développement agricole doivent s'intéresser à la valorisation des produits de ce fruitier agroforestier autochtone afin de motiver les communautés locales dans les stratégies de conservation de cette espèce pourvoyeuse de revenu additionnel pour les ménages. L'espèce figure également sur la liste rouge des espèces menacées comme étant vulnérables, selon l'UICN. Une étude approfondie sur le développement de programmes d'amélioration s'avère indispensable pour mieux conserver l'espèce.

Remerciements

Nous remercions DAAD climapAfrica (No. 91785431) et AGNES (African-German Network of Excellence in Science) pour les financements pour la recherche accordés à K. Dimobe. Nous exprimons également notre gratitude à la population locale de la zone d'étude pour sa collaboration.

Financement

Ce travail a bénéficié d'un appui financier de DAAD climapAfrica (No. 91785431) et de l'African-German Network of Excellence in Science (AGNES).

Accès aux données

Les données utilisées dans cet article sont disponibles dans l'entrepôt numérique privé de ZENODO via le lien Internet suivant: <https://doi.org/10.5281/zenodo.8097867>. Veuillez informer et citer les auteurs, et référez-vous à cet article lorsque vous utilisez ces données.

Références

- Ahlström A., Raupach M. R., Schurgers G, Smith B., Arneth A., *et al.*, 2015. The dominant role of semi-arid ecosystems in the trend and variability of the land CO₂ sink. *Science*, 348: 895-899. <https://doi.org/10.1126/science.aaa1668>
- Albrecht A., Kandji S. T., 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 99: 15-27. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00138-5](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00138-5)
- Aleza K., Wala K., Bayala J., Villamor G. B., Dourma M., *et al.*, 2015. Population structure and regeneration status of *Vitellaria Paradoxa* (C. F. Gaertner) under different land management regimes in Atacora department, Benin. *Agroforestry Systems*, 89: 511-523. <https://doi.org/10.1007/s10457-015-9787-9>
- Arevalo J., 2016. Improving woodfuel governance in Burkina Faso: The experts' assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57: 1398-1408. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.178>

- Bargués-Tobella A., Hasselquist N. J., Bazié H. R., Bayala J., Laudon H., *et al.*, 2020. Trees in African drylands can promote deep soil and groundwater recharge in a future climate with more intense rainfall. *Land Degradation & Development*, 31: 81-95. <https://doi.org/10.1002/ldr.3430>
- Bargués Tobella A., Reese H., Almaw A., Bayala J., Malmer A., *et al.*, 2014. The effect of trees on preferential flow and soil infiltration in an agroforestry parkland in semiarid Burkina Faso. *Water Resource Research*, 50: 3342-3354. <https://doi.org/10.1002/2013WR015197>
- Bayala J., Balesdent J., Marol C., Zapata F., Teklehaimanot Z., *et al.*, 2006. Relative contribution of trees and crops to soil carbon content in a parkland system in Burkina Faso using variations in natural ¹³C abundance. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 76: 193-201. <https://doi.org/10.1007/s10705-005-1547-1>
- Bayala J., Ouedraogo S. J., Teklehaimanot Z., 2008. Rejuvenating indigenous trees in agroforestry parkland systems for better fruit production using crown pruning. *Agroforestry Systems*, 72: 187-194. <https://doi.org/10.1007/s10457-007-9099-9>
- Bayala J., Sanou J., Teklehaimanot Z., Kalinganire A., Ouédraogo S. J., 2014. Parklands for buffering climate risk and sustaining agricultural production in the Sahel of West Africa. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 6: 28-34. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.10.004>
- Bayala J., Sanou J., Bazié H. R., Coe R., Kalinganire A., *et al.*, 2020. Regenerated trees in farmers' fields increase soil carbon across the Sahel. *Agroforestry Systems*, 94: 401-415. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00403-6>
- Bazié P., Ky-Dembele C., Jourdan C., Rounsard O., Zombre G., *et al.*, 2019. Synchrony in the phenologies of fine roots and leaves of *Vitellaria paradoxa* in different land uses of Burkina Faso. *Agroforestry Systems*, 93: 449-460. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0135-0>
- Bennett A. C., McDowell N. G., Allen C. D., Anderson-Teixeira K. J., 2015. Larger trees suffer most during drought in forests worldwide. *Nature Plants*, 1: 15139. <https://doi.org/10.1038/nplants.2015.139>
- Binam J. N., Place F., Kalinganire A., Hamade S., Boureima M., *et al.*, 2015. Effects of farmer managed natural regeneration on livelihoods in semi-arid West Africa. *Environmental Economics and Policy Studies*, 17: 543-575. <https://doi.org/10.1007/s10018-015-0107-4>
- Blaser W. J., Oppong J., Hart S. P., Landolt J., Yeboah E., *et al.*, 2018. Climate-smart sustainable agriculture in low-to-intermediate shade agroforests. *Nature Sustainability*, 1: 234-239. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0062-8>
- Boffa J.-M., 1999. *Agroforestry parklands in sub-Saharan Africa*. Rome, Italy, FAO. <https://www.fao.org/3/x3940e/x3940e00.htm#TOC>
- Boffa J.-M., 2015. Opportunities and challenges in the improvement of the shea (*Vitellaria paradoxa*) resource and its management. Nairobi, Kenya, World Agroforestry Centre, 76 p. <https://apps.worldagroforestry.org/downloads/Publications/PDFS/B17800.pdf>
- Bondé L., 2019. Distribution, production fruitière et potentiel socio-économique de *Tamarindus indica* L. et de *Vitellaria paradoxa* C.F. Gaertn. au Burkina Faso. Thèse de doctorat, Université Joseph Ki-Zerbo, Burkina Faso, 182 p.
- Bonkougou E. G., 2004. L'arbre à karité (*Vitellaria paradoxa*) et les parcs à karité en Afrique. In : Atelier international sur le traitement, la valorisation et le commerce du karité en Afrique. FAO et CFC, 54-63. <https://www.fao.org/publications/card/fr/c/8dce81da-8d95-580d-b9f8-2c50a5bdb8ee>
- Bonkougou E. G., Ayuk E. T., Depommier D., Morant P., Ouadba J. M., 1994. Les parcs agroforestiers des zones semi-arides d'Afrique de l'Ouest : conclusions et recommandations. Symposium international sur les parcs agroforestiers, Ouagadougou, Burkina Faso, 25-27 octobre 1993. Nairobi, ICRAF, 226 p. <https://agritrop.cirad.fr/325919/>
- Cerda R., Deheuvels O., Calvache D., Niehaus L., Saenz Y., *et al.*, 2014. Contribution of cocoa agroforestry systems to family income and domestic consumption: looking toward intensification. *Agroforestry Systems*, 88: 957-981. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9691-8>
- Chabi A., Lautenbach S., Orekan V. O. A., Kyei-Baffour N., 2016. Allometric models and aboveground biomass stocks of a West African Sudan Savannah watershed in Benin. *Carbon Balance and Management*, 11: 16. <https://doi.org/10.1186/s13021-016-0058-5>
- Cyamweshi A. R., Kuyah S., Mukuralinda A., Muthuri C. W., 2021. Potential of *Alnus acuminata* based agroforestry for carbon sequestration and other ecosystem services in Rwanda. *Agroforestry Systems*, 95: 1125-1135. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10457-021-00619-5>
- Dagnelie P., 1998. *Statistique théorique et appliquée*. De Boeck Université, 516 p.
- Dietz J., Kuyah S., 2011. Guidelines for establishing regional allometric equations for biomass estimation through destructive sampling. Nairobi, Kenya, World Agroforestry Center (ICRAF).
- Dimobe K., Goetze D., Ouédraogo A., Mensah S., Akpagana K., *et al.*, 2018a. Aboveground biomass allometric equations and carbon content of the shea butter tree (*Vitellaria paradoxa* C.F. Gaertn., Sapotaceae) components in Sudanian savannas (West Africa). *Agroforestry Systems*, 93: 1119-1132. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0213-y>
- Dimobe K., Tondoh J. E., Weber J. C., Bayala J., Ouédraogo K., *et al.*, 2018b. Farmers' preferred tree species and their potential carbon stocks in southern Burkina Faso: Implications for biocarbon initiatives. *PLoS One*, 13: 1-21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199488>
- Dimobe K., Kouakou J., Tondoh J., Zoungrana B., Forkuor G., *et al.*, 2018c. Predicting the Potential Impact of Climate Change on Carbon Stock in Semi-Arid West African Savannas. *Land*, 7: 124. <https://www.mdpi.com/2073-445X/7/4/124#>
- Dimobe K., Ouédraogo A., Ouédraogo K., Goetze D., Stein K., *et al.*, 2020. Climate change reduces the distribution area of the shea tree (*Vitellaria paradoxa* C.F. Gaertn.) in Burkina Faso. *Journal of Arid Environments*, 181: 104237. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104237>

- Enquist B. J., West G. B., Charnov E. L., Brown J. H., 1999. Allometric scaling of production and life-history variation in vascular plants. *Nature*, 401: 907-911. <https://doi.org/10.1038/44819>
- Fischer C., Kleinn C., Fehrmann L., Fuchs H., Panferov O., 2011. A national level forest resource assessment for Burkina Faso – A field based forest inventory in a semiarid environment combining small sample size with large observation plots. *Forest Ecology and Management*, 262: 1532-1540. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.07.001>
- Gaisberger H., Kindt R., Loo J., Schmidt M., Bognounou F., et al., 2017. Spatially explicit multi-threat assessment of food tree species in Burkina Faso: A fine-scale approach. *PLoS One*, 12: e0184457. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0184457>
- Gnangle P. C., Egah J., Baco M. N., Gbemavo C. D. S. J., Kakaï R. G., et al., 2012. Perceptions locales du changement climatique et mesures d'adaptation dans la gestion des parcs à karité au Nord-Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 6: 136-149. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v6i1.13>
- Ilstedt U., Bargués Tobella A., Bazié H. R., Bayala J., Verbeeten E., et al., 2016. Intermediate tree cover can maximize groundwater recharge in the seasonally dry tropics. *Scientific Reports*, 6: 21930. <https://doi.org/10.1038/srep21930>
- Kaboré S. A., Bastide B., Traoré S., Boussim J. I., 2012. Dynamique du karité, *Vitellaria paradoxa*, dans les systèmes agraires du Burkina Faso. *Bois et Forêts des Tropiques*, 313 : 47-59. <https://doi.org/10.19182/bft2012.313.a20496>
- Kelly B. A., Gourlet-Fleury S., Bouvet J.-M., 2007. Impact of agroforestry practices on the flowering phenology of *Vitellaria paradoxa* in parklands in southern Mali. *Agroforestry Systems* 71: 67-75. <https://doi.org/10.1007/s10457-007-9074-5>
- Kim D.-G., Kirschbaum M. U. F., Beedy T. L., 2016. Carbon sequestration and net emissions of CH₄ and N₂O under agroforestry: Synthesizing available data and suggestions for future studies. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 226: 65-78. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.04.011>
- Kinda P. T., Zerbo P., Guenné S., Compaoré M., Ciobica A., et al., 2017. Medicinal plants used for neuropsychiatric disorders treatment in the Hauts Bassins region of Burkina Faso. *Medicines*, 4: 32. <https://doi.org/10.3390/medicines4020032>
- Kirby K. R., Potvin C., 2007. Variation in carbon storage among tree species: implications for the management of a small-scale carbon sink project. *Forest Ecology and Management*, 246: 208-221. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.03.072>
- Kuyah S., Öborn I., Jonsson M., Dahlin A. S., Barrios E., et al., 2016. Trees in agricultural landscapes enhance provision of ecosystem services in Sub-Saharan Africa. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 12: 255-273. <https://doi.org/10.1080/21513732.2016.1214178>
- Kuyah S., Whitney C. W., Jonsson M., Sileshi G. W., Öborn I., et al., 2019a. Agroforestry delivers a win-win solution for ecosystem services in sub-Saharan Africa. A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 39: 47. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0589-8>
- Kuyah S., Sileshi G. W., Luedeling E., Akinnifesi F. K., Whitney C. W., et al., 2019b. Potential of agroforestry to enhance livelihood security in Africa. In: Dagar J. C., Gupta S. R., Teketay D. (eds). *Agroforestry for Degraded Landscapes*. Springer, 135-167. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-4136-0_4
- Lamien N., Ouédraogo S. J., Diallo O. B., Guinko S., 2004. Productivité fruitière du karité (*Vitellaria paradoxa* Gaertn. C.F., Sapotaceae) dans les parcs agroforestiers traditionnels au Burkina Faso. *Fruits*, 59 : 423-429. <https://revues.cirad.fr/index.php/fruits/article/view/35862>
- Leakey R. R. B., Tientcheu Avana M.-L., Awazi N. P., Assogbadjo A. E., Mabhaudhi T., et al., 2022. The Future of Food: Domestication and Commercialization of Indigenous Food Crops in Africa over the Third Decade (2012-2021). *Sustainability*, 14: 2355. <https://doi.org/10.3390/su14042355>
- Lovett P. N., Haq N., 2000. Evidence for anthropic selection of the Sheanut tree (*Vitellaria paradoxa*). *Agroforestry Systems*, 48: 273-288. <https://doi.org/10.1023/A:1006379217851>
- Luedeling E., Neufeldt H., 2012. Carbon sequestration potential of parkland agroforestry in the Sahel. *Climatic Change*, 115: 443-461. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0438-0>
- Mbow C., Smith P., Skole D., Duguma L., Bustamante M., 2014a. Achieving mitigation and adaptation to climate change through sustainable agroforestry practices in Africa. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 6: 8-14. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.09.002>
- Mbow C., Van Noordwijk M., Luedeling E., Neufeldt H., Minang P. A., Kowero G., 2014b. Agroforestry solutions to address food security and climate change challenges in Africa. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 6: 61-67. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.10.014>
- Mensah S., Noulèkoun F., Ago E. E., 2020. Aboveground tree carbon stocks in West African semi-arid ecosystems: Dominance patterns, size class allocation and structural drivers. *Global Ecology and Conservation*, 24: e01331. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01331>
- Meyer T., D'Odorico P., Okin G. S., Shugart H. H., Caylor K. K., et al., 2014. An analysis of structure: biomass structure relationships for characteristic species of the western Kalahari, Botswana. *African Journal of Ecology*, 52: 20-29. <https://doi.org/10.1111/aje.12086>
- Mononen K., Pitkänen S., 2016. Sustainable fuelwood management in West Africa. University of Eastern Finland, 150 p. https://www.oph.fi/sites/default/files/documents/sustainable-fuelwood-management-in-west-africa_4.pdf
- Mutuo P. K., Cadisch G., Albrecht A., Palm C. A., Verchot L., 2005. Potential of agroforestry for carbon sequestration and mitigation of greenhouse gas emissions from soils in the tropics. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 71: 43-54. <https://doi.org/10.1007/s10705-004-5285-6>
- Ndoli A., Baudron F., Schut A. G. T., Mukuralinda A., Giller K. E., 2017. Disentangling the positive and negative effects of trees on maize performance in smallholdings of Northern Rwanda. *Field Crops Research*, 213: 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.07.020>

Nicolas J.-P., 2018. Plantes médicinales pour le soin de la famille au Burkina Faso. Quimper, France, Jardins du Monde, 268 p. <https://duddal.org/s/bibnum-promap/item/3885#c=0&m=0&s=0&cv=0>

Ojo O., Kengne M. H. K., Fotsing M. C., Mmutlane E. M., Ndinteh D. T., 2021. Traditional uses, phytochemistry, pharmacology and other potential applications of *Vitellaria paradoxa* Gaertn. (Sapotaceae): A review. Arabian Journal of Chemistry, 14: 103213. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103213>

Ouoba H. Y., Bastide B., Coulibaly-lingani P., Albert S., Issaka J., 2018. Connaissances et perceptions des producteurs sur la gestion des parcs à *Vitellaria paradoxa* C. F. Gaertn. (karité) au Burkina Faso. International Journal of Biological and Chemical Sciences, 12: 2766-2783. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v12i6.23>

Ouoba Y. H., Bastide B., Coulibaly-Lingani P., Kaboré S. A., Yaméogo-Gaméné S. C., et al., 2020. Régénération assistée du karité (*Vitellaria paradoxa* C. F. Gaertn.) dans les parcs agroforestiers au Burkina Faso. European Scientific Journal, 16 (40) : 23-48. <https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n40p23>

Pouliot M., 2012. Contribution of “Women’s Gold” to West African Livelihoods: The Case of Shea (*Vitellaria paradoxa*) in Burkina Faso. Economic Botany, 66: 237-248. <https://doi.org/10.1007/s12231-012-9203-6>

Poulter B., Frank D., Ciais P., Myneni R.B., Andela N., et al., 2014. Contribution of semi-arid ecosystems to interannual variability of the global carbon cycle. Nature, 509: 600-603. <https://doi.org/10.1038/nature13376>

Ræbild A., Larsen A. S., Jensen J. S., Ouedraogo M., De Groot S., et al., 2011. Advances in domestication of indigenous fruit trees in the West African Sahel. New Forests, 41: 297-315. <https://doi.org/10.1007/s11056-010-9237-5>

Sanogo K., Gebrekirstos A., Bayala J., Villamor G. B., Kalinganire A., et al., 2016. Potential of dendrochronology in assessing carbon sequestration rates of *Vitellaria paradoxa* in southern Mali, West Africa. Dendrochronologia, 40: 26-35. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2016.05.004>

Sanogo K., Bayala J., Villamor G. B., Dodiomon S., van Noordwijk M., 2021. A non-destructive method for estimating woody biomass and carbon stocks of *Vitellaria paradoxa* in southern Mali, West Africa. Agroforestry Systems, 95: 135-150. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00578-3>

Sanou H., Kambou S., Teklehaimanot Z., Dembélé M., Yossi H., et al., 2004. Vegetative propagation of *Vitellaria paradoxa* by grafting. Agroforestry Systems, 60: 93-99. <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000009408.03728.46>

Takimoto A., Nair P. K. R., Nair V. D., 2008. Carbon stock and sequestration potential of traditional and improved agroforestry systems in the West African Sahel. Agriculture, Ecosystems & Environment, 125: 159-166. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2007.12.010>

Tanyi T. F., Etongo D., Abdoulaye R., 2018. Assessing the sustainability of fuelwood production and its potential impact on REDD+ in Burkina Faso. International Journal of Environment Studies, 75: 186-200. <https://doi.org/10.1080/0207233.2017.1386435>

van Noordwijk M., Bayala J., Hairiah K., Lusiana B., Muthuri C., et al., 2014. Agroforestry solutions for buffering climate variability and adapting to change. In: Fuhrer J., Gregory P. J. (eds). Climate change impact and adaptation in agricultural systems. Wallingford, UK, CABI International, 216-232. <https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=FseWBAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA216&ots=YEHBkEeSlU&sig=JQF1jHoleKa3V-Ti0cBsKLR816S0#v=onepage&q&f=false>

Van Pelt R., Sillett S. C., Kruse W. A., Freund J. A., Kramer R. D., 2016. Emergent crowns and light-use complementarity lead to global maximum biomass and leaf area in *Sequoia sempervirens* forests. Forest Ecology and Management, 375: 279-308. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.05.018>

Zizka A., Thiombiano A., Dressler S., Nacoulma B. M. I., Ouédraogo A., et al., 2015. Traditional plant use in Burkina Faso (West Africa): a national-scale analysis with focus on traditional medicine. Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine, 11: 9. <https://doi.org/10.1186/1746-4269-11-9>

Dimobe et al. – Contribution des auteurs

Rôle du contributeur	Noms des auteurs
Conceptualisation	K. Dimobe, J. Bayala
Gestion des données	K. Dimobe
Analyse formelle	K. Dimobe
Acquisition du financement	K. Dimobe
Enquête et investigation	K. Dimobe
Méthodologie	K. Dimobe
Gestion de projet	K. Dimobe
Ressources	K. Dimobe
Logiciels	K. Dimobe
Supervision	J. Bayala
Validation	K. Dimobe
Visualisation	K. Dimobe
Écriture – Préparation de l'ébauche originale	K. Dimobe
Écriture – Révision et édition	K. Dimobe, J. Bayala

Bois et Forêts des Tropiques - Revue scientifique du Cirad -
© Bois et Forêts des Tropiques © Cirad



Cirad - Campus international de Baillarguet,
34398 Montpellier Cedex 5, France
Contact : bft@cirad.fr - ISSN : L-0006-579X

L'agroforesterie en contexte post-forestier : perspectives et controverses d'une mise à l'agenda politique en Côte d'Ivoire

Hadrien DI ROBERTO^{1,2}
Carolina MILHORANCE^{1,2}
Ndèye Sokhna DIENG^{3,4}
Elsa SANIAL⁵

¹ Cirad
UMR ART-Dev
34398 Montpellier
France

² ART-Dev, Univ Montpellier,
CNRS, Univ Paul Valéry
Montpellier 3, Univ Perpignan
Via Domitia, Cirad
Montpellier
France

³ Cirad
UMR SENS
34398 Montpellier
France

⁴ SENS, CIRAD, IRD, Université
Paul Valéry Montpellier 3
Montpellier
France

⁵ Nitidae
29, rue Imbert-Colomès
69001 Lyon
France

Auteur correspondant / Corresponding author:

Hadrien DI ROBERTO –
hadrien.di_roberto@cirad.fr



Photo 1.

Projet pilote agroforestier hévéicole dans la forêt classée d'Anguédédou en Côte d'Ivoire.
Rubber agroforestry pilot project in the Anguédédou protected forest in Côte d'Ivoire.
Photo N. S. Dieng, mai 2021.

Doi : 10.19182/bft2023.356.a37121 – Droit d'auteur © 2023, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 15 novembre 2022 ; date d'acceptation : 27 juin 2023 ; date de publication : 1^{er} juillet 2023.



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

Citer l'article / To cite the article

Di Roberto H., Milhorance C., Dieng N. S., Sanial E., 2023. L'agroforesterie en contexte post-forestier : perspectives et controverses d'une mise à l'agenda politique en Côte d'Ivoire. Bois et Forêts des Tropiques, 356: 81-91.
Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2023.356.a37121>

RÉSUMÉ

L'agroforesterie en contexte post-forestier : perspectives et controverses d'une mise à l'agenda politique en Côte d'Ivoire

En Côte d'Ivoire, l'agroforesterie devient une notion incontournable après une déforestation massive pour les cultures de plantation. Depuis les années 2010, le terme se généralise dans le vocabulaire politique, les normes internationales de durabilité et la communication des entreprises chocolatières. Cette note examine comment l'agroforesterie s'est imposée dans l'agenda politique ivoirien. Adoptant une approche compréhensive et à partir d'une soixantaine d'entretiens et des documents politiques, elle analyse la manière dont la notion d'agroforesterie est mobilisée en Côte d'Ivoire, les instruments de sa promotion et les controverses qu'elle suscite. D'abord, ce travail montre que la mise à l'agenda de l'agroforesterie en Côte d'Ivoire se fait suivant des canaux pluriels. Différents instruments de promotion de l'agroforesterie se côtoient, tels que les normes de certification privée, la norme africaine régionale de durabilité pour le cacao, les paiements pour services environnementaux ou encore un dispositif national dit « Agro-Forêt », issu du nouveau Code forestier. Ensuite, malgré le consensus sur la promotion de l'agroforesterie, sa définition large permet à des acteurs aux intérêts divergents de s'approprier le concept. Ce travail met par ailleurs en évidence la pluralité des objectifs et des perspectives que recouvre la notion en Côte d'Ivoire. Il identifie ainsi des controverses concernant les critères du système agroforestier, sa finalité, la place des agriculteurs, l'échelle d'analyse et la temporalité à considérer. En définitive, cette note contribue à expliciter les traductions politiques plurielles d'une notion issue des sciences. Les liens complexes entre les recherches biophysiques et la pratique politique soulignent l'importance de prendre en compte cette interface pour une meilleure conception de l'agroforesterie et une transition efficace.

Mots-clés : agroforesterie, politiques publiques, normes techniques, Côte d'Ivoire.

ABSTRACT

Agroforestry in a post-forest context: perspectives and controversies of political agenda setting in the Republic of Côte d'Ivoire

In the Republic of Côte d'Ivoire, agroforestry has emerged as a key concept following extensive deforestation for plantation agriculture. Since the 2010s, this term has gained prominence in political discourse, international sustainability standards, and advertisements by chocolate companies. This article delves into the establishment of agroforestry in the Ivorian political landscape. Employing a comprehensive approach grounded in approximately sixty interviews and political documents, it analyzes the mobilization of the agroforestry concept in the Republic of Côte d'Ivoire, delves into the strategies employed for its promotion, and unveils the controversies it sparks. To begin, this study highlights that the integration of agroforestry into Côte d'Ivoire's agenda occurs through diverse avenues. A myriad of instruments to promote agroforestry coexist, encompassing private certification standards, the regional African sustainability standard for cocoa, compensation for environmental services, and a domestic initiative named « Agro-Forêt » originating from the newly enacted Forestry Code. Moreover, notwithstanding the consensus surrounding agroforestry promotion, its broad definition permits stakeholders with varying interests to appropriate the concept. This study also sheds light on the multitude of objectives and perspectives embedded within the concept's interpretation in the Republic of Côte d'Ivoire. It identifies controversies regarding the criteria of the agroforestry framework, its underlying purpose, the role of farmers, the scope of analysis, and the temporal dimensions to be considered. In conclusion, this note contributes to clarifying the diverse political translations of a concept originating from scientific studies. The intricate connections between biophysical research and political practice highlight the significance of considering this interface for an enhanced understanding of agroforestry and a successful transition.

Keywords: agroforestry, public policies, technical standards, Côte d'Ivoire.

RESUMEN

La agroforestería en un contexto postforestal: perspectivas y controversias de la inclusión en la agenda política de Costa de Marfil

En Costa de Marfil, la agroforestería se está convirtiendo en un concepto esencial tras la deforestación masiva para los cultivos de plantación. Desde la década de 2010, el término se ha generalizado en el vocabulario político, las normas internacionales de sostenibilidad y la comunicación de las empresas chocolateras. Este artículo examina cómo la agroforestería ha pasado a formar parte de la agenda política marfileña. Adoptando un enfoque global, y basándose en unas sesenta entrevistas y documentos políticos, analiza la forma en que se utiliza el concepto de agroforestería en Costa de Marfil, los instrumentos empleados para promoverlo y las controversias que suscita. En primer lugar, este trabajo demuestra que la agenda de la agroforestería se está introduciendo en Costa de Marfil a través de diversos canales. Se utilizan varios instrumentos para promover la agroforestería, como las normas de certificación privada, la norma regional africana de sostenibilidad para el cacao, los pagos por servicios medioambientales y un dispositivo nacional de « agroforestería » en el marco del nuevo Código Forestal. En segundo lugar, a pesar del consenso sobre la promoción de la agroforestería, su amplia definición permite que actores con intereses divergentes se apropien del concepto. Este trabajo pone de relieve la pluralidad de objetivos y perspectivas que abarca el concepto en Costa de Marfil. Identifica las controversias relativas a los criterios del sistema agroforestal, su finalidad, el papel de los agricultores, la escala de análisis y el marco temporal a considerar. En última instancia, este estudio contribuye a aclarar las múltiples traducciones políticas de un concepto proveniente de la ciencia. Los complejos vínculos entre la investigación biofísica y la práctica política subrayan la importancia de tener en cuenta esta interfaz para una mejor concepción de la agroforestería y una transición eficaz.

Palabras clave: agroforestería, política pública, normas técnicas, Costa de Marfil.

Introduction

Un nombre croissant de travaux de recherche, programmes publics de développement et initiatives d'entreprises privées promeuvent l'agroforesterie comme une réponse aux enjeux de durabilité des systèmes agricoles. L'agroforesterie consiste à utiliser, de manière délibérée, des espèces d'arbres sur les mêmes terres que les cultures agricoles ou le bétail (Gassner et Dobie, 2022). Si ses promoteurs insistent sur une logique « gagnant-gagnant » au regard des objectifs environnementaux, de l'augmentation des performances agricoles et de la diversification des revenus des producteurs (Kuyah *et al.*, 2019 ; Smith Dumont *et al.*, 2014), sa mise en œuvre implique des approches distinctes, et parfois divergentes, selon les techniques promues et les acteurs impliqués. Atangana *et al.* (2014) identifient plus de 100 types de systèmes agroforestiers à travers le monde. Ollinaho et Kröger (2021) soulignent la relation entre la nature des pratiques agroforestières et leurs contextes socio-économiques, notamment les enjeux auxquels sont confrontées les communautés paysannes (*i. e.* droits fonciers, accès aux ressources, accès au capital, sécurité alimentaire, inégalités sociales). En outre, les formes d'agroforesterie sont présentées de manière large dans la littérature, pouvant faire l'objet de modes distincts de mise en œuvre.

La Côte d'Ivoire est le premier producteur mondial de cacao et fait face à une déforestation massive (Pirard *et al.*, 2021 ; Cuny *et al.*, 2023). Dans un contexte post-forestier, l'agroforesterie apparaît aujourd'hui comme un terme incontournable et comme une solution pour pérenniser la culture du cacao (Jagoret *et al.*, 2020). Initialement, le cacao était cultivé dans des systèmes agroforestiers, mais, depuis les années 1960, des pratiques proches de la monoculture se sont répandues, entraînant un appauvrissement de la fertilité des sols, une quête vers de nouvelles terres et une déforestation accrue (Assiri *et al.*, 2009 ; Gyau *et al.*, 2015 ; Ruf, 2018 ; Sanial, 2018). Les régions de production font face à une forte dégradation des sols, une variabilité accrue des régimes pluviométriques et une pression parasitaire, ce qui affecte les rendements des cacaoyères en place et rend coûteuses les replantations (Ruf *et al.*, 2015).

Si la pratique de l'agroforesterie est ancienne en Côte d'Ivoire, c'est surtout depuis le milieu des années 2010 que ce terme se généralise en dehors des milieux scientifiques. Il s'impose désormais dans le vocabulaire politique, dans les normes de durabilité et dans la communication des entreprises chocolatières. En effet, l'agroforesterie serait une manière d'œuvrer au reboisement afin de respecter les engagements internationaux du pays tout en maintenant son activité agricole. Enfin, l'agroforesterie apparaît davantage compatible avec les exigences des marchés internationaux du cacao en matière de « durabilité », notamment celles du marché européen.

Ainsi, dans un contexte de promotion de l'agroforesterie à l'intersection de dynamiques nationales et internationales de recherche, du marché, du développement agricole et de la préservation des forêts, quels sont les

multiples points de vue et objectifs qui sous-tendent cette mise à l'agenda en Côte d'Ivoire ? Comment s'opposent-ils ou se complètent-ils ? Et quelles implications sociales, politiques et environnementales peuvent découler des différentes approches ? Notre objectif n'est pas de dresser un état des lieux des pratiques de l'agroforesterie au sein des exploitations agricoles¹. Nous nous interrogeons plutôt sur l'insertion de l'agroforesterie dans l'agenda politique, en examinant les acteurs impliqués, l'adoption de normes techniques et les différentes conceptions qui en résultent.

D'abord, nous détaillons notre démarche analytique. Ensuite, nous présentons les principales conceptions sous-tendant l'intégration de l'agroforesterie dans les politiques nationales de la Côte d'Ivoire. Enfin, nous examinons les controverses entourant ces définitions, les processus politiques en jeu, et leurs limites.

Démarche d'analyse

Cette note de position adopte une approche compréhensive² pour examiner la façon dont les politiques publiques sont fabriquées, se transforment et sont mises en œuvre. Une attention particulière est accordée à la manière dont les acteurs interprètent et construisent les problèmes publics. Cette approche englobe divers courants d'analyse, qui diffèrent des approches « rationalistes » de type coût/avantage, lesquelles se concentrent davantage sur la résolution des problèmes (Peters, 2015). L'objectif est de mieux comprendre comment des acteurs différents définissent des « problèmes », des « causes » et des « solutions » dans le processus de mise à l'agenda. Par ailleurs, chaque nouvelle solution peut modifier la répartition des pouvoirs, c'est pourquoi ce processus de définition peut comprendre des interprétations concurrentes (Zittoun, 2017).

Nous soutenons, en outre, qu'une partie du succès de la notion d'agroforesterie tient aussi au flou qui l'entoure. En effet, la force de certaines notions qui circulent à l'échelle globale vient de leur capacité à englober une multitude de significations (Cornwall, 2010). Certains termes présentent des caractéristiques qui renforcent une perception d'utilité dans une variété de contextes tout en maintenant une ambiguïté autour de leur signification (Cairns et Krzywoszynska, 2016). Le caractère imprécis de certaines normes permet à des acteurs aux intérêts, ressources, points de vue et besoins hétérogènes d'être impliqués ou de se les approprier (Merino et Gustafsson, 2021). L'agroforesterie semble faire partie de ces notions dont l'ambiguïté permet de fédérer des objectifs qui pouvaient sembler avant contradictoires.

Enfin, lorsqu'il s'agit de la fabrication de politiques publiques à l'interface entre la sphère internationale et nationale, la redéfinition des problèmes selon les perspectives et les jeux d'acteurs nationaux est également cruciale. La notion de « traduction » met en lumière la façon dont les normes internationales peuvent être transformées dans le processus de mise à l'agenda national, en se concentrant

¹ Pour cela, voir Yao *et al.* (2016) ou Sanial (2019).

² Les approches compréhensives visent à comprendre un phénomène en explorant le sens que lui donnent les acteurs eux-mêmes.

sur les idées, les acteurs et les institutions (Hassenteufel et Zeigermann, 2021). Cette note de position s'inscrit dans cette démarche analytique qui propose une réflexion préliminaire sur le cas de la Côte d'Ivoire afin d'alimenter le dialogue entre les sciences sociales et les sciences biophysiques.

Notre propos repose sur une enquête qualitative combinant des recherches documentaires et des entretiens semi-directifs. Les recherches documentaires ont été réalisées en effectuant une revue historique des stratégies politiques, plans, lois et décrets concernant la zone forestière, ainsi qu'en analysant le contenu des documents sectoriels (y compris les objectifs prioritaires, les instruments, les publics bénéficiaires et les acteurs impliqués). De plus, entre 2019 et 2023, nous avons mené 69 entretiens avec diverses parties prenantes, notamment des cadres des ministères et agences publiques, des scientifiques, des représentants d'ONG, du mouvement paysan, de coopératives et d'entreprises nationales et multinationales. Ces entretiens, basés sur un échantillonnage dimensionné suivant la méthode en boule de neige³, portaient sur des aspects tels que le rôle de l'institution, ses actions dans les domaines agricole et forestier, les approches privilégiées pour promouvoir l'agroforesterie, les défis rencontrés et les interactions avec d'autres acteurs.

La prise en compte de l'agroforesterie dans les politiques publiques et les normes de durabilité

Comment l'agroforesterie se traduit-elle dans les politiques publiques en Côte d'Ivoire ? Conçus aux échelles nationale et internationale, une diversité d'instruments émerge pour la promotion de l'agroforesterie. Nous pouvons distinguer les initiatives visant le domaine rural portées par les acteurs de la filière cacao, celles destinées au domaine forestier de l'État notamment à travers l'instrument « Agro-Forêt » et celles associées aux paiements pour services environnementaux.

L'agroforesterie autour de la filière cacao

Dans le domaine rural, la promotion de l'agroforesterie s'organise principalement autour de la filière cacao. L'agroforesterie occupe une place importante dans les normes privées de certification durable (Jagoret *et al.*, 2020). Par exemple, la norme Rainforest Alliance demande aux producteurs certifiés de maintenir et accroître la couverture arborée et/ou la diversité de la végétation. Les exploitations agricoles sont tenues d'augmenter les surfaces de végétation naturelle et d'atteindre un taux d'ombrage fixé à 15 % pour les cultures tolérantes à l'ombre (Rainforest Alliance, 2020).

Ensuite, les entreprises du cacao promeuvent l'agroforesterie pour répondre aux nouvelles exigences environnementales des marchés⁴. Depuis les années 2010, l'agroforesterie devient une composante importante des programmes de durabilité de la plupart des multinationales du chocolat⁵. Ces engagements restent volontaires et ne s'appliquent pas de manière systématique (Amiel et Laurans, 2019).

Enfin, l'agroforesterie occupe une place de choix dans les normes internationales. Anticipant sur la nouvelle réglementation européenne⁶, et une norme internationale (ISO 34101) en cours de discussion pour un cacao « durable et traçable » (Carimentrand, 2021), le Ghana et la Côte d'Ivoire ont entrepris en 2019 la formulation d'une norme africaine régionale (ARS-1000). Face à la « prolifération des normes »⁷ et des engagements volontaires privés, la Côte d'Ivoire entend ainsi instituer un cadre commun à la production et à la certification du cacao (Carimentrand, 2021). Cette norme est intégrée aux politiques nationales et réglementée par les organismes de régulation du cacao de chaque pays. Elle offre aux pays producteurs une opportunité de renforcer leur contrôle sur la régulation de la filière cacao, en tenant compte de la réglementation européenne contraignante sur la déforestation importée (African Organization for Standardization, 2021 ; IDH, 2023). Le Conseil Café Cacao⁸ a produit une norme technique afin d'identifier des modèles agroforestiers « applicables dans le cadre de la norme ARS-1000 afin de répondre aux exigences écologiques, environnementales, sociales et économiques dans la production du cacao » et avec pour objectif de « soutenir de façon durable la production de cacao » (Conseil Café Cacao, 2022). Le compromis entre cacaoyers et arbres associés reste inscrit dans

³ Échantillonnage de proche en proche qui consiste à identifier de nouveaux acteurs en mobilisant le capital social des personnes enquêtées. L'objectif était d'identifier un large panel d'individus occupant des postes clés dans différentes institutions en Côte d'Ivoire.

⁴ Entretiens avec six entreprises du secteur cacao, octobre 2019.

⁵ Voir les programmes « *Forever Chocolate* » pour Barry-Callebaut ; « *Cocoa For Generation* » pour Mars ; « *Transparence Cacao* » pour Cêmoi ; « *Cocoa Life* » pour Mondelez. L'ampleur des défis structurels à laquelle est confrontée la filière pousse à des solutions menées à grande échelle associant différents acteurs publics et privés. Ainsi, l'entreprise chocolatière Cêmoi a par exemple collaboré avec le Conseil Café Cacao à la mise en œuvre du programme « Cacao Ami des Forêts », visant à répondre aux défis de la déforestation et du vieillissement des exploitations via des itinéraires techniques agroforestiers (Transparence Cacao, 2022).

⁶ Un règlement de l'Union européenne, visant à lutter contre la déforestation importée de certaines commodités agricoles, dont le cacao, a été adopté en 2023. Selon ce règlement, le cacao importé doit être produit sur des terres non déforestées après le 31 décembre 2020 et être considéré comme « légal », conformément aux lois en vigueur dans le pays de production. De plus, la Stratégie nationale française contre la déforestation importée repose également sur le concept de « zéro déforestation » pour les entreprises importatrices.

⁷ Conseil Café Cacao, site Internet : <http://www.conseilcafecacao.ci>, consulté le 06/02/2022.

⁸ Le Conseil Café Cacao est l'organe de régulation des filières café et cacao, sous tutelle du ministère de l'Agriculture. Concernant la norme technique en matière d'agroforesterie, voir leur site (consulté le 25/06/2023) : http://www.conseilcafecacao.ci/index.php?option=com_k2&view=item&id=1226:le-conseil-du-cafe-cacao-et-ses-partenaires-elaborent-les-normes-techniques-en-matiere-d%E2%80%99agroforesterie-en-cacaoculture-a-yamoussoukro&Itemid=18

une perspective productive et agricole⁹. Les arbres associés sont choisis parce que « compatibles avec le cacaoyer », leur nombre doit se situer entre 25 et 40 arbres/ha et avec une densité minimale en cacaoyers de 800 pieds/ha (Conseil Café Cacao, 2022). L'objectif est d'introduire 60 millions d'arbres d'ici 2025 dans les zones de production de cacao (environ 25 arbres/ha¹⁰). Ces efforts répondent aussi à des pressions plus importantes des marchés internationaux, notamment européen.

La distribution de plants, parfois combinée à des activités de formation, fait partie des principales actions de promotion de l'agroforesterie. Le nombre de plants distribués est particulièrement utilisé pour publiciser les efforts déployés. Parlant et facile à communiquer, cet indicateur (le nombre de plants) est sujet à de nombreuses critiques, car il ne dit rien de la réalité des arbres plantés et de leur maintien dans la durée : « Le gouvernement parle de 60 millions de plants distribués ; mais quel contrôle ensuite, quelle mise en œuvre sur le terrain ? »¹¹ s'interroge un responsable d'ONG. Une étude récente montre que, malgré de vastes programmes de distribution, la part des arbres plantés au sein des vergers cacaoyers reste marginale (Kouassi *et al.*, 2023). De plus, peu de données existent sur les taux de survie des plants distribués. Bien que la distribution d'arbres aille généralement de pair avec des systèmes de contrôle, l'audit est si difficile à mener sérieusement sur le terrain que les effets de telles initiatives sont contestés (Kouassi *et al.*, 2023 ; Ruf, 2023 ; Ruf *et al.*, 2019).

L'agroforesterie dans les forêts classées

Les forêts classées du domaine privé de l'État¹² ont été largement converties en espaces agricoles par des paysans en quête de terres, et cela malgré l'interdiction légale. Aujourd'hui, on estime leur couvert forestier à 13,3 % (Pirard *et al.*, 2021 ; Cuny *et al.*, 2023). Le ministère des Eaux et Forêts (MINEF) et la Société de développement des forêts (SODEFOR) sont les principaux acteurs publics actuellement engagés dans la gestion de ces espaces. Ils ont mis en place diverses stratégies pour restaurer ces espaces forestiers, allant de la destruction des cultures illégales et des campements à des approches de cogestion avec les paysans, notamment par le biais des « commissions paysans-forêts » (Ibo, 2001). Depuis quelques années, l'agroforesterie est au cœur des stratégies de reboisement.

L'idée n'est pas nouvelle et l'administration forestière avait déjà expérimenté des programmes de diffusion de l'agroforesterie dans les champs des paysans installés dans les forêts classées. Le Plan directeur forestier 1988-2015 encourageait les initiatives de diffusion de l'agrofo-

resterie pour « faire face à la réalité de l'imbrication des cultures dans la forêt » (Ministère des Eaux et Forêts, 1988). Par exemple, dans la forêt de Béki, des parcelles agricoles ont été reboisées avec une densité élevée d'environ 100 arbres/ha¹³ et les paysans tenus de participer à l'entretien des arbres forestiers plantés dans leurs parcelles.

Aujourd'hui, l'agroforesterie prend une nouvelle ampleur dans les forêts classées à travers la création de l'instrument « Agro-Forêt » et le nouveau Code forestier de 2019. Selon ce code et son décret d'application de 2021, les forêts classées présentant un taux de dégradation supérieur à 75 % peuvent être converties en Agro-Forêts. Cela concerne 76 forêts classées, pour une superficie totale de 1,8 million d'hectares. C'est un changement important, car l'agriculture qui était auparavant interdite sur ces espaces (quoique pratiquée illégalement) est désormais autorisée, mais uniquement sous la forme d'agroforesterie (Ministère des Eaux et Forêts, 2019).

Par ailleurs, le dispositif Agro-Forêt rend les forêts d'État éligibles au régime de la concession pour y développer des projets agroforestiers¹⁴. En théorie, les concessions peuvent être accordées à des personnes physiques ou morales, incluant des entreprises privées, des communautés rurales ou des collectivités territoriales (République de Côte d'Ivoire, 2019). En pratique, les demandes de concessions jusqu'en 2023 ont été faites par des entreprises privées. Cette prédominance s'explique par la volonté d'attirer des financements privés et la crédibilité qu'ils semblent inspirer à l'État pour respecter les plans d'aménagement agroforestiers (Ministère des Eaux et Forêts, 2018). Ces entreprises deviendraient aménageuses des Agro-Forêts, assumant ainsi certaines anciennes prérogatives de la SODEFOR. Certains considèrent que cela pourrait progressivement exclure la SODEFOR, dont le rôle se limiterait probablement à des fonctions régaliennes pour assurer la bonne application du Code forestier et des plans d'aménagement des Agro-Forêts¹⁵.

Pour le moment, aucun projet n'a démarré. Les demandes de concession dont nous avons eu connaissance concernent des entreprises du secteur palmier à huile et hévéa. Ces projets agroforestiers se composent de plusieurs rangées d'hévéa et de quelques rangées d'arbres forestiers, sans véritable association de cultures. Un projet pilote a été mis en place dans la forêt classée d'Anguédou, en collaboration avec le ministère des Eaux et Forêts et une entreprise hévéicole (photo 1). Pour le moment, les Agro-Forêts semblent s'inscrire dans un modèle d'agroforesterie industrielle et commerciale (Ollinaho et Kröger, 2021) caractérisé par l'absence (ou une présence limitée) de cultures associées.

⁹ Il succède au « manuel de cacaoculture durable » de 2015 qui recommandait 15 à 18 arbres d'ombrage par hectare (Conseil Café Cacao, 2015), et se veut à terme plus contraignant, puisque associé à une mise en conformité avec les exigences de la norme ARS-1000 (entretien, juin 2021).

¹⁰ Entretien, juin 2021.

¹¹ Entretien, décembre 2022.

¹² Une forêt classée est une zone forestière délimitée, appartenant à l'État, réservée à l'exploitation forestière et réglementée quant aux activités et aux acteurs autorisés.

¹³ Entretiens et visites de la forêt classée de Béki, juin 2021.

¹⁴ La concession consiste à concéder un droit sur la terre à une entité juridique visant à autoriser l'exploitation d'une ressource (Karsenty, 2017). En Côte d'Ivoire, aucune concession sur les Agro-Forêts n'a encore été créée, mais des plans d'aménagement et des contrats d'exploitation agricole et forestière sont en cours de validation.

¹⁵ Entretiens, institution étatique et bailleur de fonds international, octobre 2022.

L'agroforesterie dans les stratégies d'atténuation et d'adaptation au changement climatique

L'agroforesterie est également promue à travers des projets de paiements pour les services environnementaux (PSE). La Stratégie nationale de REDD+ de la Côte d'Ivoire encourage l'agroforesterie via des contrats individuels de PSE avec les producteurs (REDD+, 2017). Ces contrats favorisent l'utilisation d'espèces locales, à la hauteur d'au moins 30 arbres/ha, et mettent l'accent sur les essences utiles aux populations rurales (alimentaires, médicinales, énergétiques, etc.). De même, le ministère de l'Environnement et du Développement durable (MINEDD), en collaboration avec des bailleurs internationaux et des ONG, met en œuvre des projets de PSE¹⁶. Il estime que cet instrument permet d'impliquer davantage les agriculteurs dans l'agroforesterie en leur offrant la possibilité de valoriser leurs efforts de conservation forestière. Des chocolatiers comme Mondelez encouragent aussi l'agroforesterie cacao (30 arbres/ha) à travers des systèmes de prime à l'arbre. Dans le cadre du projet « *Cocoa Life* », l'entreprise offre une prime pour chaque arbre planté afin de motiver les producteurs. Selon des responsables de coopératives, la prime à la plantation est une stratégie efficace face au constat d'arbres distribués, mais non plantés, par les producteurs¹⁷.

L'agroforesterie s'appuie aussi sur les perspectives de développement d'une finance carbone en Côte d'Ivoire. Des investisseurs et des ONG développent des projets de compensation carbone qui seront vendus sur le « marché volontaire » aux entreprises désireuses de devenir « neutres en carbone ». Bien qu'il n'existe pas encore de réglementation nationale sur le partage des bénéfices des crédits carbone, des actions privées incitent déjà la plantation d'arbres et l'agroforesterie avec cet outil.

Quelle agroforesterie ? Controverses et compromis politiques

Si le principe général de l'agroforesterie semble largement accepté, son intégration dans l'agenda politique (dont nous avons présenté quelques manifestations en Côte d'Ivoire) révèle une pluralité d'approches et des points de controverse. En effet, la mise en acte de politiques autour de l'agroforesterie a contribué à lever le voile fédérateur de cette notion protéiforme. La question « quelle agroforesterie promouvoir ? » est donc centrale et sujette à controverse.

Afin d'y voir plus clair, nous avons caractérisé la diversité des approches et des visions des divers acteurs institutionnels (ministères, institutions internationales, ONG, chercheurs ou organisations des filières agricoles). Il ne s'agit pas de nommer explicitement les opinions de groupes ou d'acteurs spécifiques¹⁸, mais plutôt d'identifier les prin-

cipaux points de désaccord. Ainsi, la diversité des perspectives des acteurs interrogés peut être appréhendée suivant cinq axes qui représentent plusieurs manières (non limitatives) dont les acteurs perçoivent leurs désaccords (figure 1).

Des divergences sur la finalité de l'agroforesterie

En Côte d'Ivoire, plusieurs perspectives de l'agroforesterie se distinguent et coexistent. Comme mentionné précédemment, pour certains acteurs du monde agricole, l'agroforesterie est perçue comme une « panacée », voire une « fatalité », face aux défis structurels de la filière cacao. D'après ces acteurs, « il n'y a plus le choix, il faut faire de l'agroforesterie pour continuer à produire du cacao à long terme »¹⁹. Par exemple, le programme « Cacao Ami des Forêts » (partenariat entre le chocolatier Cémoi et le Conseil Café Cacao) affiche comme objectif prioritaire de « contribuer au développement de nouveaux itinéraires techniques d'agroforesterie permettant d'atteindre des rendements minimums de 1 000 kg de cacao par hectare » (EcoTierra, 2017). Le type de système agroforestier à privilégier est donc orienté par les objectifs de maintien de la productivité agricole (Critchley *et al.*, 2021).

Une deuxième perspective considère l'agroforesterie comme une étape vers un objectif prioritaire de reboisement et d'exploitation forestière. Certains acteurs de la filière bois y voient une manière de reconstituer les stocks du domaine rural et de stabiliser l'extension des surfaces agricoles, voire de les faire disparaître à long terme dans les forêts classées. Cette perspective repose sur une vision où la production agricole, même agroforestière, occupe une place contestée. Ainsi, dans les dites Agro-Forêts, l'autorisation de l'agroforesterie y est perçue comme temporaire, les objectifs visés étant de reboiser et de « reprendre en main les forêts classées à long terme »²⁰.

L'agroforesterie peut aussi être mobilisée dans une perspective environnementale. Avec un taux de déforestation élevé (2,8 %/an) (Pirard *et al.*, 2021 ; Cuny *et al.*, 2023), la Côte d'Ivoire est signataire de la déclaration de New York sur les forêts, visant à réduire les pertes forestières de moitié d'ici 2020 et à les éliminer d'ici 2030. Cependant, en Côte d'Ivoire l'agroforesterie ne fait pas l'unanimité parmi les organisations de la société civile qui militent pour l'environnement. Pour certaines ONG, l'intérêt croissant pour l'agroforesterie est un moyen de légitimer le développement des cultures de rente dans les zones protégées (AAEN-CI, 2023). Pour d'autres, l'ambiguïté du terme pourrait servir une rhétorique environnementale sans véritable changement de pratiques, posant ainsi la question du *greenwashing*. Cette vision critique rejoint l'hypothèse selon laquelle les systèmes agroforestiers complexes de cacao de Côte d'Ivoire sont « plus probablement des vestiges du passé que des modèles pour l'avenir » (Ruf, 2011). Par ailleurs, un aspect marquant de nos entretiens est le lien faible entre l'agroforesterie et l'objectif de réduction de l'utilisation d'intrants

¹⁶ Entretien, MINEDD, mars 2022 ; agence de développement, février 2023.

¹⁷ Entretiens, mars 2023.

¹⁸ Cela contreviendrait au principe d'anonymat des entretiens et poserait des problèmes méthodologiques étant donné qu'il existe des débats au sein de certaines institutions, dont les individus qui les composent peuvent porter des visions différentes.

¹⁹ Entretien, juin 2021.

²⁰ Entretien, MINEF/SODEFOR, mars 2021 et décembre 2021.

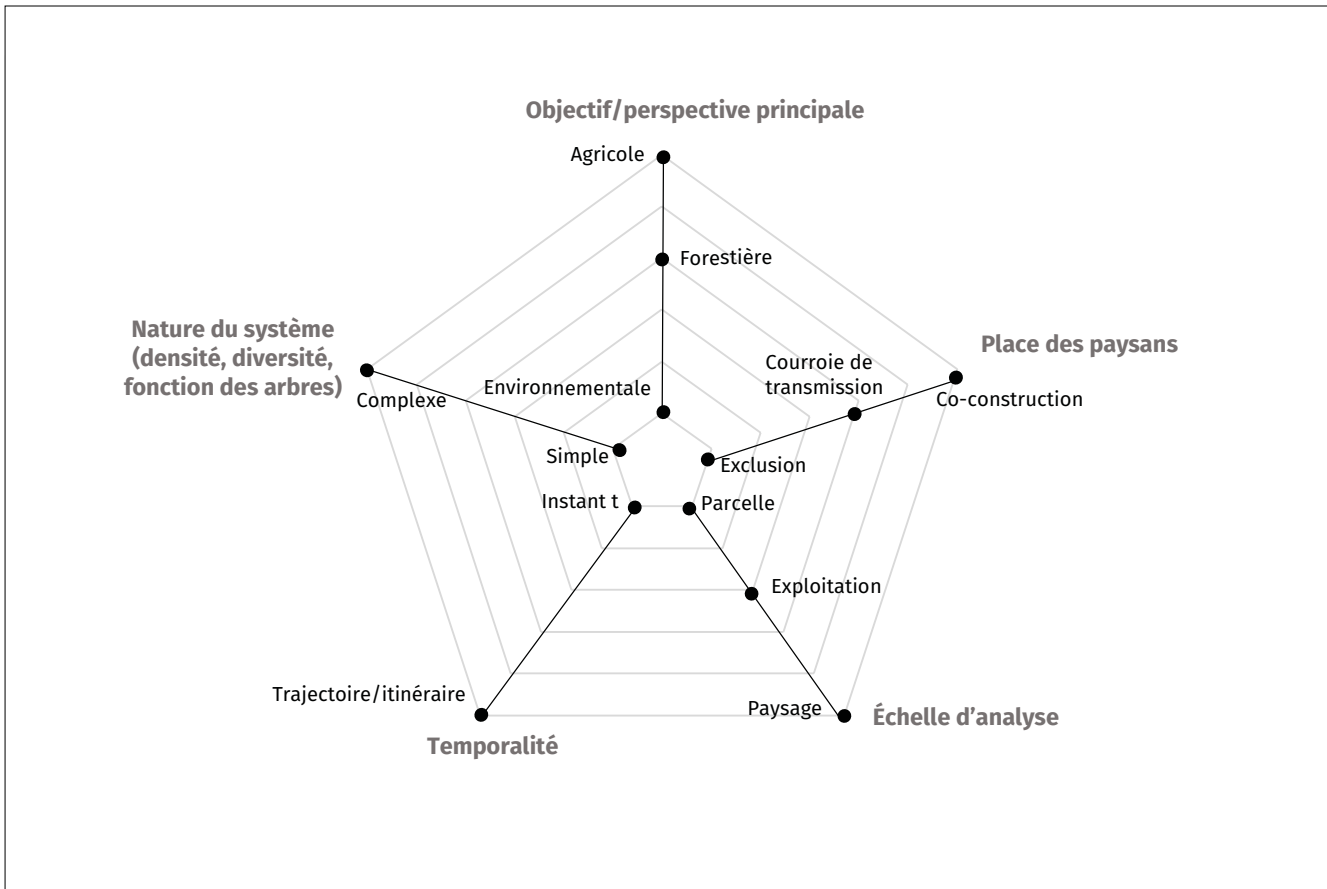


Figure 1. Points principaux de divergence selon les acteurs institutionnels en Côte d'Ivoire.
 Main points of divergence according to institutional actors in Côte d'Ivoire.

chimiques (engrais et pesticides). Alors que ce lien est fait dans les débats internationaux (CIFOR, 2018 ; Fudemma, 2020 ; Ollinaho et Kröger, 2021), le virage agroforestier qu'entend opérer l'État ivoirien ne remet nullement en question le recours aux intrants chimiques²¹.

La place ambiguë des paysans

Tantôt idéalisés pour leurs « savoirs traditionnels », tantôt accusés d'être moteurs de la déforestation et réfractaires à changer leurs pratiques de quasi-monoculture, les paysans occupent une place ambiguë dans le débat public sur l'agroforesterie.

D'une part, nos entretiens montrent l'emploi récurrent de termes comme « contraindre », « inciter », « convaincre », « mieux contrôler » ou encore « sensibiliser » les agriculteurs. Ces termes témoignent d'un objectif de faire infléchir les pratiques des agriculteurs. Ils apparaissent ainsi comme une courroie de transmission pour la mise en œuvre de systèmes agroforestiers conçus en amont. Pourtant, les travaux empiriques montrent que les agriculteurs mettent déjà en place de nouvelles associations d'espèces (Sanial, 2019). D'autres

conçoivent l'agroforesterie comme un mode de gestion intégrée des ressources naturelles impliquant les agriculteurs, le bétail et les arbres à de multiples échelles. Plusieurs organisations, dont des instituts de recherche, des fondations et des acteurs de la coopération internationale, se reconnaissent dans cette vision où les systèmes de production peuvent être « co-construits » avec les paysans. Cela implique une compréhension des espèces d'arbres considérées comme utiles par les agriculteurs (Gyau *et al.*, 2015) et une prise en compte de la composition arborée existante lors de la conception des itinéraires techniques agroforestiers. L'accent mis sur les programmes d'accompagnement des paysans à long terme se heurte aux difficultés d'opérationnalisation de ces initiatives sur le terrain.

D'autre part, la place des agriculteurs dans les Agro-Forêts est particulièrement sensible. Selon le modèle en cours d'élaboration, les Agro-Forêts seront divisées en deux zones : une « temporaire » pour les plantations industrielles, et une « permanente »²² où les agriculteurs seraient regroupés et devraient adopter l'agroforesterie. Tous les paysans ne pouvant être relocalisés, certains pourraient être sélectionnés et forcés de quitter la forêt classée en fonction

²¹ Entretiens, novembre 2022, avril 2023.

²² Entretiens, entre octobre 2019 et décembre 2022.

de critères d'éligibilité, ce qui soulève des critiques²³. Un autre modèle d'Agro-Forêt, proposé par le Projet d'investissement financier de la Banque mondiale, entend quant à lui maintenir sur place les populations installées. Les agriculteurs signeraient des contrats les engageant à pratiquer l'agroforesterie et seraient autorisés à rester dans les Agro-Forêts pendant la durée du projet. Ceux qui refuseraient de pratiquer l'agroforesterie devraient quitter la forêt classée et bénéficieraient d'un accompagnement professionnel. La diffusion de l'agroforesterie reste donc assez coercitive. Les paysans n'ont d'autre choix que d'adopter l'agroforesterie à travers les itinéraires techniques prodigués.

Par ailleurs, l'objectif à long terme étant la reconstitution d'espaces forestiers, la régularisation des paysans installés dans ces espaces, en leur conférant une plus grande sécurité foncière, n'est pas envisagée. Cette insécurité foncière des paysans dans les forêts classées pourrait être un frein à l'adoption de l'agroforesterie dans ces espaces.

La nature simple ou complexe des systèmes agroforestiers

Si l'idée d'associer des arbres avec des cultures agricoles ou de l'élevage semble faire consensus dans les différentes arènes politiques, la nature du système agroforestier à promouvoir fait débat. Ces débats portent notamment sur le nombre d'arbres (exprimé en taux d'ombrage ou en surface terrière) et la diversité des essences. La recherche est souvent appelée à agir comme arbitre dans la définition de l'agroforesterie. « À partir de combien d'arbres peut-on parler d'agroforesterie ? C'est aux scientifiques de nous dire... »²⁴ rapporte un cadre du ministère de l'Agriculture. Dans le même esprit, d'autres s'interrogent : « C'est quoi l'agroforesterie ? C'est là que la recherche devrait intervenir pour trouver un consensus. [...] On s'était donné une fourchette : entre 20 et 50 espèces. Je pense que, si on a un bon cadre scientifique, le dialogue politique viendra après. »²⁵

Cependant, la préférence pour un système agroforestier particulier dépend largement de la hiérarchie des objectifs des acteurs politiques et institutionnels. En Côte d'Ivoire, nous avons vu que la production des normes agroforestières se structure autour de filières agricoles, en particulier du cacao. Dans la pratique, une tension est visible entre les acteurs de la filière cacao et ceux qui soutiennent une recomposition plus significative du couvert forestier. Les discussions autour de la norme ARS-1000 illustrent cette tension : « Le nombre d'arbres est un gros débat. Chacun a son avis et ce n'est pas franchement lié à un débat scientifique. C'est lié aux visions des personnes. Certains disent qu'on peut aller à 100 arbres à l'hectare sans avoir d'effet néfaste sur le cacao. [...] Mais les acteurs de la filière cacao veulent que ça reste des vergers de cacao. Il faut aussi faire vivre les planteurs. En plus, s'il y a trop d'arbres, il va avoir peur que sa plantation ne devienne une exploitation forestière. Alors certains parlent de 30 arbres, de 40 arbres. [...] Finalement, une

fourchette de 25 à 40 arbres à l'hectare a été fixée. »²⁶ Pour certains ce chiffre est relativement bas, mais offre un seuil minimum permettant « de proposer des normes volontaires supérieures et laisser un espace pour des marchés cacao plus exigeants »²⁷.

Les ONG de certification du cacao durable ont également ajusté leurs critères de définition d'un système agroforestier. Par exemple, Rainforest Alliance a considérablement revu à la baisse le nombre d'arbres à l'hectare exigé pour que l'agroforesterie reste acceptable par les producteurs de cacao (Sanial *et al.*, 2020). Elle a finalement abandonné le critère du nombre d'arbres pour retenir le critère du taux d'ombrage proposé par Blaser *et al.* (2018), qui a été considéré comme un compromis entre fourniture de services écosystémiques et production du cacao. Ce taux d'abord fixé à 30 % a ensuite été divisé par deux pour passer à 15 % dans la norme 2020, un compromis politique jugé plus acceptable.

Comme pour leur nombre, les choix du type d'arbre relèvent aussi d'un compromis entre un état des savoirs scientifiques et des considérations sociopolitiques. En effet, l'opérationnalité de la norme est soumise au degré d'adhésion des planteurs qui semblaient avoir un intérêt pour les fruitiers. « Lors de l'atelier on était d'accord pour dire que les planteurs semblaient avoir une préférence pour les fruitiers, car ils permettent un revenu complémentaire à court/moyen terme. Mais ce n'est pas parce que le planteur préfère le fruitier qu'il faut faire seulement du fruitier. L'enjeu c'est de trouver un arbitrage acceptable pour une bonne polyculture... »²⁸

Échelle d'analyse et temporalité

Les systèmes agroforestiers sont d'abord et principalement abordés à l'échelle des parcelles ou à l'échelle des exploitations. Ainsi, la norme africaine ARS-1000 se concentre sur les parcelles de cacao, tandis que d'autres normes de certification raisonnent à l'échelle des exploitations agricoles en incluant la végétation naturelle non seulement des parcelles, mais aussi des haies, des zones de conservation au sein de l'exploitation ou encore autour des logements. D'autres acteurs préconisent d'envisager la transition agroforestière à l'échelle territoriale ou des paysages (*landscape*). Depuis quelques années, ces approches semblent se développer et des projets tentent d'intégrer plusieurs filières et considèrent des espaces à la fois agricoles et forestiers²⁹.

L'agroforesterie peut également être basée sur une séquence temporelle d'arbres et de cultures, impliquant que les arbres et les cultures se succèdent au fil du temps. Cela inclut des pratiques telles que les jachères arborées, l'agriculture itinérante et certaines formes de plantations en relais. Cependant, en Côte d'Ivoire, cette approche est encore peu adoptée, malgré les résultats des études scientifiques qui mettent en évidence les avantages de la régénération naturelle (Kouassi *et al.*, 2023).

Enfin, pour la définition des normes cacao durable, juger d'un système agroforestier demande d'identifier une

²³ Entretien, entre octobre 2019 et décembre 2022.

²⁴ Entretien, ministère de l'Agriculture, mars 2022.

²⁵ Entretien, décembre 2022.

²⁶ Entretien, participant à un atelier officiel sur la norme ARS-1000, novembre 2022.

²⁷ Entretien, membre d'une organisation de certification, décembre 2022.

²⁸ Entretien, participant à un atelier officiel sur la norme ARS-1000, novembre 2022.

²⁹ Entretien, novembre 2022.

situation de départ (pouvant aller de la forêt primaire à une déforestation complète) et d'observer la trajectoire d'évolution du couvert arboré (diminution par l'élimination d'arbres associés ou densification par la plantation ou la régénération spontanée). Ainsi, on portera un jugement différent sur deux parcelles agroforestières identiques, selon que l'une est issue de la déforestation et l'autre d'une replantation d'arbres. C'est pourquoi déterminer la date d'une situation de départ est pour certains un critère central dans la définition d'une norme. Pour Rainforest Alliance, une parcelle ne peut être certifiée que si elle est déjà cultivée depuis au moins 2014. Concernant ARS-1000, sa vocation contraignante rendait difficile d'imposer une date reculée, car cela reviendrait à exclure de fait un grand nombre de parcelles : « On avait parlé de 2018, puis certains pensaient que c'était trop, alors on a parlé de 2020. »

Conclusion

Cette note de position s'est intéressée à la manière dont l'agroforesterie a gagné en importance dans le débat public en Côte d'Ivoire au cours des dernières années. L'agroforesterie apparaît à la fois comme une solution technique pour pérenniser la production de cacao dans un contexte post-forestier et une manière d'œuvrer à la reforestation dans un contexte où les préoccupations environnementales se conjuguent à des exigences des marchés internationaux du cacao en matière de « déforestation importée ». Des acteurs institutionnels de plus en plus nombreux mobilisent le concept qui entend conjuguer des objectifs environnementaux, de production agricole et de reboisement, historiquement antagonistes en Côte d'Ivoire. Mais sa définition large facilite une appropriation par un grand nombre d'acteurs aux intérêts parfois divergents.

Ce travail met en évidence différents outils de promotion de l'agroforesterie en Côte d'Ivoire, tels que les normes de certification privées, la norme africaine régionale de durabilité pour le cacao, les paiements pour services environnementaux ou encore un dispositif national dit « Agro-Forêt ». Ces instruments et ces normes s'inscrivent dans des dynamiques internationales, mais sont traduits dans des pratiques politiques nationales qui dépassent l'adoption simpliste de cadres exogènes. Malgré des contraintes imposées par les règlements internationaux et les marchés, les acteurs nationaux, en particulier ceux de la filière du cacao, cherchent à prendre en main ce processus en produisant des normes régionales et en définissant leurs critères des systèmes agroforestiers. En parallèle, dans les forêts classées, où l'agroforesterie a une histoire plus ancienne, le dispositif Agro-Forêt issu du Code forestier de 2019 émerge comme un nouvel outil d'aménagement du domaine privé de l'État.

Par ailleurs, ce travail montre qu'en Côte d'Ivoire le relatif consensus autour de la promotion de l'agroforesterie masque une grande diversité d'approches et d'objectifs. Cette diversité des perspectives et des résultats possibles souligne l'importance de considérer les différents points de vue. Dans le contexte de l'inscription de l'agroforesterie à l'agenda politique, les débats portent notamment sur

la finalité de l'agroforesterie, le rôle des petits agriculteurs et la définition des critères d'un système agroforestier. Sur ce dernier point, les sciences biophysiques sont souvent appelées à jouer un rôle d'arbitre, pourtant la définition de seuils (tels que le nombre d'arbres à l'hectare, de types d'espèces, le taux d'ombrage, etc.) relève aussi de compromis économiques et politiques. Les relations entre les recherches agronomiques et forestières et la pratique politique sont donc intriquées et dynamiques. Prendre cette interface en compte est essentiel pour mieux concevoir l'approche de l'agroforesterie dans chaque contexte, ainsi que ses défis de mise en œuvre et les perspectives d'un véritable processus de transition.

Financement

L'étude a bénéficié des financements des projets Terri4Sol (Restauration des sols et de la multifonctionnalité des paysages forestiers dégradés de Côte d'Ivoire, FFEM/ UE/ MINADER) et Cocoa4Future (Durabilité des systèmes de production et dynamiques nouvelles du secteur cacaoyer, UE/AFD), de la fondation Zoein et du Cirad.

Conditions d'enquête

Lors de l'enquête et des interviews, toutes les personnes interrogées ont été informées des objectifs de l'étude et ont accepté volontairement d'y participer, sous couvert d'anonymat. L'anonymat a été respecté et les données collectées dans le cadre des projets Terri4Sol et Cocoa4Futur sont conformes aux plans de gestion des données.

Références

- AAEN-CI (Action pour l'avenir de l'environnement naturel en Côte d'Ivoire), 2023. Les projets de la Fondation. Site web, AAEN-CI. <http://www.aaen-ci.org/projets.htm>. Consulté le 26/01/2023
- African Organization for Standardization, 2021. Catalogue of African Regional Standards. African Organization for Standardization/Organisation Africaine de Normalisation, 42 p. <https://www.arso-oran.org/wp-content/uploads/2021/07/Catalogue-of-African-Regional-Standards-ARS-June-2021-TC.pdf>
- ORAN. https://www.arso-oran.org/?page_id=49
- Amiel F., Laurans Y., 2019. Pour un cacao sans déforestation : performance des labels et des actions d'entreprises. *Décryptage (IDDRI SciencesPo)* 10 : 4 p. <https://www.iddri.org/sites/default/files/PDF/Publications/Catalogue%20Iddri/D%C3%A9cryptage/201910-IB1019FR-cacao.pdf>
- Assiri A. A., Yoro G. R., Deheuvels O., Kébé B. I., Keli Z. J., et al., 2009. Les caractéristiques agronomiques des vergers de cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) en Côte d'Ivoire. *Journal of Animal and Plant Sciences*, 2 (1) : 55-66. <https://agritrop.cirad.fr/555828/>
- Atangana A., Khasa D., Chang S., Degrande A., 2014. Tropi-

- cal Agroforestry. Springer Netherlands, 290 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7723-1>
- Blaser W. J., Oppong J., Hart S. P., Landolt J., Yeboah E., et al., 2018. Climate-smart sustainable agriculture in low-to-intermediate shade agroforests. *Nature Sustainability*, 1 (5): 234-239. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0062-8>
- Cairns R., Krzywoszynska A., 2016. Anatomy of a buzzword: The emergence of “the water-energy-food nexus” in UK natural resource debates. *Environmental Science & Policy*, 64: 164-170. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.07.007>
- Carimentrand A., 2021. Certification du cacao et lutte contre la déforestation – État des lieux sur la déforestation importée et les schémas de certification de l'objectif zéro-déforestation dans la filière cacao. AFD, CST Forêt, 69 p. https://www.cst-foret.org/wp-content/uploads/CST-Foret_rapport-Certification-du-cacao-et-lutte-contre-la-deforestation.pdf
- CIFOR, 2018. Agro-écologie et agroforesterie pour une gestion durable des forêts : Diagnostic des opportunités de développer l'agro-écologie et l'agroforesterie dans le paysage de Yangambi. CIFOR-ICRAF, 4 p. <https://www.cifor-icraf.org/knowledge/publication/5022/>
- Conseil Café Cacao, 2015. Conseil du Café-Cacao de Côte d'Ivoire. Manuel technique de cacaoculture durable. World Cocoa Foundation, USAID, IDH The Sustainable Trade Initiative, 166 p. http://www.conseilcafecacao.ci/docs/2016/MANUEL_CACAOCULTURE_040415.pdf
- Conseil Café Cacao, 2022. Le Conseil du Café-Cacao et ses partenaires élaborent les normes techniques en matière d'agroforesterie en cacaoculture. Site web, Conseil Café Cacao de Côte d'Ivoire. http://www.conseilcafecacao.ci/index.php?option=com_k2&view=item&id=1226:le-conseil-du-cafe-cacao-et-ses-partenaires-elaborent-les-normes-techniques-en-matiere-d%E2%80%99agroforesterie-en-cacaoculture-a-yamoussoukro&Itemid=18
- Cornwall A., 2010. Buzzwords and fuzzwords: Deconstructing development discourse. *Development in Practice*, 17 (4-5): 471-484. <https://doi.org/10.1080/09614520701469302>
- Critchley M., Sassen M., Umunay P., 2021. Mapping opportunities for cocoa agroforestry in Côte d'Ivoire: Assessing its potential to contribute to national forest cover restoration targets and ecosystem services co-benefits. *Wageningen University & Research*, 43 p. <https://research.wur.nl/en/publications/mapping-opportunities-for-cocoa-agroforestry-in-c%C3%B4te-divoire-asse>
- Cuny P., Plancheron F., Bio A., Kouakou E., Morneau F., 2023. La forêt et la faune de Côte d'Ivoire dans une situation alarmante – Synthèse des résultats de l'Inventaire forestier et faunique national. *Bois et Forêts des Tropiques*, 355 : 47-72. <https://doi.org/10.19182/bft2023.355.a36939>
- Ecotierra, 2017. Plan de mise en œuvre « Transparence Cacao ». Site web, Ecotierra. <https://www.ecotierra.co/>
- Futemma C., 2020. Organic Agriculture, Agroecology, and Agroforestry: Small Farmers in Brazil. In: Arce Ibarra M., Parra Vázquez M. R., Bello Baltazar E., Gomes de Araujo L. (eds). *Socio-Environmental Regimes and Local Visions: Transdisciplinary Experiences in Latin America*. Springer International Publishing, 409-433. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49767-5_20
- Gassner A., Dobie P., 2022. *Agroforestry: A primer*. CIFOR-ICRAF, 181 p. <https://doi.org/10.5716/cifor-icraf/BK.25114>
- Gyau A., Smoot K., Diby L., Kouame C., 2015. Drivers of tree presence and densities: The case of cocoa agroforestry systems in the Soubre region of Republic of Côte d'Ivoire. *Agroforestry Systems*, 89 (1): 149-161. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9750-1>
- Hassenteufel P., Zeigermann U., 2021. Translation and translators in policy transfer processes. In: *Handbook of Policy Transfer, Diffusion and Circulation*. Edward Elgar Publishing, 58-79. <https://doi.org/10.4337/9781789905601.00011>
- Ibo J. G., 2001. La gestion des forêts en Côte d'Ivoire de 1900 à 2000. In: Collas de Chatelperron P. (éd.). *Gestion durable des forêts au Cameroun : vers une foresterie responsable, contributions du projet Forêts et Terroirs*. Montpellier, France, Cirad, 13-32. <https://agritrop.cirad.fr/481242/>
- IDH, 2023. Interlinkages between ARS-1000 & EUDR need to be realized for the benefit of sustainable, deforestation-free cocoa. An explainer. IDH The Sustainable Trade Initiative, 5 p. https://www.idhsustainabletrade.com/uploaded/2023/05/Interlinkages-between-ARS1000-and-EUDR_IDH-May-2023.pdf
- Jagoret P., Saj S., Carimentrand A., 2020. Cacaoculture agroforestière en Afrique : l'art de concilier production durable et services écologiques. *Perspective*, 54 : 1-4. <https://doi.org/10.19182/perspective/31915>
- Karsenty A., 2017. Chapitre 30 – Concessions forestières : une évolution vers des institutions du développement territorial ? In: Caron P., Valette E., Wassenaar T., Coppens d'Eeckenbrugge G., Papazian V. (éds). *Des territoires vivants pour transformer le monde*. Versailles, France, Éditions Quæ, 191-196. <https://www.cairn.info/des-territoires-vivants-pour-transformer-le-monde--9782759226542-page-191.htm>
- Kouassi A., Zo-Bi I. C., Aussenac R., Kouamé I. K., Dago M. R., et al., 2023. The Great Mistake of Plantation Programs in Cocoa Agroforests – Let's Bet on Natural Regeneration to Sustainably Provide Timber Wood. *SSRN Scholarly Paper No. 4358251*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4358251>
- Kuyah S., Whitney C. W., Jonsson M., Sileshi G. W., Öborn I., et al., 2019. Agroforestry delivers a win-win solution for ecosystem services in sub-Saharan Africa. A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 39: 47. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0589-8>
- Merino R., Gustafsson M.-T., 2021. Localizing the indigenous environmental steward norm: The making of conservation and territorial rights in Peru. *Environmental Science & Policy*, 124: 627-634. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.07.005>
- Ministère des Eaux et Forêts, 1988. Plan directeur forestier 1988-2015. Ministère des Eaux et Forêts de Côte d'Ivoire, 87 p.
- Ministère des Eaux et Forêts, 2018. Politique nationale de préservation, de réhabilitation et d'extension des forêts. Ministère des Eaux et Forêts de Côte d'Ivoire, 52 p. https://eauxetforets.gouv.ci/sites/default/files/communiqu%C3%A9_strat_nationale_de_preservation_0.pdf
- Ministère des Eaux et Forêts, 2019. Côte d'Ivoire. Code forestier. Loi n° 2019-675 du 23 juillet 2019. Ministère des Eaux et Forêts de Côte d'Ivoire, 20 p. <https://www.droit-afrique.com/uploads/RCI-Code-2019-forestier.pdf>

Ollinaho O. I., Kröger M., 2021. Agroforestry transitions: The good, the bad and the ugly. *Journal of Rural Studies*, 82: 210-221. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.01.016>

Peters B. G., 2015. *Advanced introduction to public policy*. Cheltenham, UK, Edward Elgar Publishing, 224 p.

Pirard R., Cuny P., Plancheron F., Moynot F., Rageade M., et al., 2021. Inventaire forestier & faunistique de la Côte d'Ivoire. IGN FI, ONF International, IGN, 8 p. https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/onfi_iffn_cote_ivoire.pdf

Rainforest Alliance, 2020. Norme pour l'agriculture durable. Exigences pour les exploitations agricoles. Rainforest Alliance, 94 p. <https://www.rainforest-alliance.org/fr/resource-item/2020-exigences-pour-les-exploitations-agricoles/>

REDD+, 2017. Stratégie nationale REDD+ de la Côte d'Ivoire. REDD+ Côte d'Ivoire, République de Côte d'Ivoire, 121 p. <http://reddplus.ci/download/strategie-nationale-redd-cote-d-ivoire/>

République de Côte d'Ivoire, 2019. Décret n° 2019-978 du 27 novembre 2019 relatif à la concession de la gestion du domaine forestier privé de l'État et des collectivités territoriales. Présidence de la République de Côte d'Ivoire, 2 p. https://eauxetforets.gouv.ci/sites/default/files/communiqu/004_decret_ndeg2019-978_relatif_a_la_concession_de_la_gestion_du_domaine_forestier_privé_de_l'état_et_des_collectivités_territoriales.pdf

Ruf F., 2011. The Myth of Complex Cocoa Agroforests: The Case of Ghana. *Human Ecology*, 39 (3): 373-388. <https://doi.org/10.1007/s10745-011-9392-0>

Ruf F., 2018. Crises politico-militaires et climatiques en Côte d'Ivoire. Du cacao à l'anacarde, de la rente forêt à la fumure animale. *Tropicultura*, 36 (2) : 281-298. <https://doi.org/10.25518/2295-8010.828>

Ruf F., 2023. Le mythe du « cacao durable » [1/2]. *Sesame. Sciences et société, alimentation, mondes agricoles et environnement*. <https://revue-sesame-inrae.fr/le-mythe-du-cacao-durable-1-2/>

Ruf F., Schroth G., Doffangui K., 2015. Climate change, cocoa migrations and deforestation in West Africa: What does the past tell us about the future? *Sustainability Science*, 10 (1): 101-111. <https://doi.org/10.1007/s11625-014-0282-4>

Ruf F., Uribe Leitz E., Gboko K. C., Carimentrand A., 2019. Des certifications inutiles ? Les relations asymétriques entre coopératives, labels et cacaoculteurs en Côte d'Ivoire. *Revue Internationale des Études du Développement*, 240 (4) : 31-61. <https://www.cairn.info/revue-internationale-des-etudes-du-developpement-2019-4-page-31.htm>

Sanial E., 2018. L'appropriation de l'arbre, un nouveau front pour la cacaoculture ivoirienne ? Contraintes techniques, environnementales et foncières. *Cahiers Agricoles*, 27 (5) : 55005. <https://doi.org/10.1051/cagri/2018036>

Sanial E., 2019. À la recherche de l'ombre, géographie des systèmes agroforestiers émergents en cacaoculture ivoirienne post-forestière. Thèse de doctorat, Université Jean Moulin Lyon 3, France, 343 p. <https://www.theses.fr/2019LYSE3058>

Sanial E., Fountain A., Hoefsloot H. R., Jezeer R., 2020. L'agroforesterie dans le secteur du cacao – Un besoin d'approches de paysage collaboratives ambitieuses. Document de

consultation pour le Baromètre du Cacao. Consortium du Baromètre du Cacao, administré par le réseau VOICE, 12 p. <https://www.tropenbos.org/file.php/2346/consultation-pa-per-2020-fr.pdf>

Smith Dumont E., Gnahoua G. M., Ohouo L., Sinclair F. L., Vaast P., 2014. Farmers in Côte d'Ivoire value integrating tree diversity in cocoa for the provision of ecosystem services. *Agroforestry Systems*, 88 (6): 1047-1066. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9679-4>

Transparence Cacao, 2022. Cacao Ami des Forêts, Résultats 2021. Transparence Cacao, 3 p. <https://www.transparence-cacao.com/fr/news/2022/06/14/cacao-ami-des-forets-results-2021/>

Yao C. Y. A., Kpangui K. B., Vroh B. T. A., Ouattara D., 2016. Pratiques culturelles, valeurs d'usage et perception des paysans des espèces compagnes du cacaoyer dans des agroforêts traditionnelles au centre de la Côte d'Ivoire. *Revue d'Éthnoécologie*, 9. <https://doi.org/10.4000/ethnoecologie.2474>

Zittoun P., 2017. La fabrique pragmatique des politiques publiques. *Anthropologie & Développement*, 45 : 65-89. <https://doi.org/10.4000/anthropodev.543>

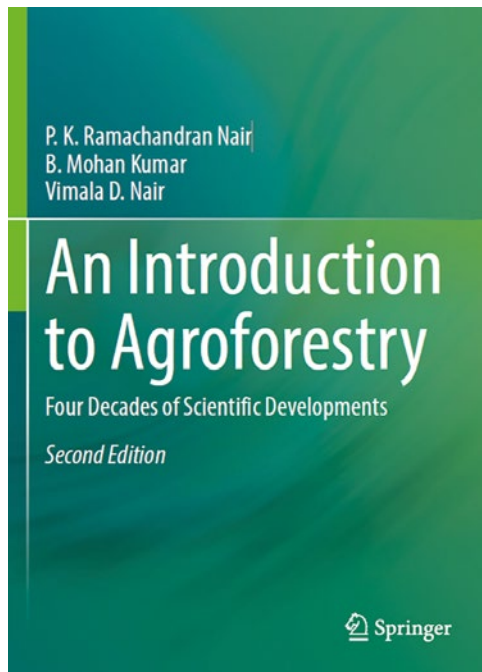
Di Roberto et al. – Contributions des auteurs

Rôle du contributeur	Noms des auteurs
Conceptualisation	H. Di Roberto, C. Milhorange
Gestion des données	H. Di Roberto, C. Milhorange, S. Dieng, E. Sanial
Acquisition du financement	C. Milhorange, S. Dieng, E. Sanial
Enquête et investigation	H. Di Roberto, C. Milhorange, S. Dieng, E. Sanial
Méthodologie	H. Di Roberto, C. Milhorange
Gestion de projet	C. Milhorange, H. Di Roberto
Ressources	H. Di Roberto, C. Milhorange, S. Dieng, E. Sanial
Supervision	C. Milhorange, H. Di Roberto
Validation	H. Di Roberto, C. Milhorange, S. Dieng, E. Sanial
Visualisation	H. Di Roberto, C. Milhorange, S. Dieng, E. Sanial
Écriture – Préparation de l'ébauche originale	H. Di Roberto, C. Milhorange, S. Dieng
Écriture – Révision et édition	H. Di Roberto, C. Milhorange, S. Dieng, E. Sanial

Bois et Forêts des Tropiques - Revue scientifique du Cirad -
© Bois et Forêts des Tropiques © Cirad



Cirad - Campus international de Baillarguet,
34398 Montpellier Cedex 5, France
Contact : bft@cirad.fr - ISSN : L-0006-579X



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>

Promouvoir l'agroforesterie ? Les leçons de la Côte d'Ivoire



Irié Casimir Zo-Bi¹
Bruno HÉRAULT^{2,3}

¹ Institut national polytechnique Félix Houphouët-Boigny
(DFR-FOREN/INP-HB)
Département de foresterie et environnement
Yamoussoukro
Côte d'Ivoire

² Cirad
UPR Forêts et Sociétés
34398 Montpellier
France

³ Forêts et Sociétés
Univ Montpellier, Cirad
Montpellier
France

Auteur correspondant / Corresponding author:
Bruno HÉRAULT – bruno.herault@cirad.fr

ORCID



Irié Casimir ZO-BI: [0000-0003-0982-8579](https://orcid.org/0000-0003-0982-8579)



Bruno HÉRAULT: [0000-0002-6950-7286](https://orcid.org/0000-0002-6950-7286)

Photo 1.

Des cacaoyers sous l'ombrage d'un iroko (*Milicia excelsa*), surcimant un avocatier (*Persea americana*) bien installé dans la strate intermédiaire.

Yamoussoukro, Côte d'Ivoire, 22 juin 2023.

Cocoa trees under the shade of an Iroko (*Milicia excelsa*), surcimant an Avocado (*Persea americana*) well established in the intermediate stratum.

Yamoussoukro, Côte d'Ivoire, June 22, 2023.

Photo I. C. Zo-Bi ©.

Doi : 10.19182/bft2023.356.a37132 – Droit d'auteur © 2023, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 28 mars 2023 ; date d'acceptation : 29 juin 2023 ; date de publication : 1^{er} juillet 2023.



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

Citer l'article / To cite the article

Zo-Bi I. C., Héralut B., 2023. Promouvoir l'agroforesterie ? Les leçons de la Côte d'Ivoire. Bois et Forêts des Tropiques, 356: 93-98. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2023.356.a37132>

RÉSUMÉ

Promouvoir l'agroforesterie ? Les leçons de la Côte d'Ivoire

L'émergence de l'agroforesterie en Côte d'Ivoire est devenue une priorité nationale. Le secteur agricole du pays génère 70 % des recettes d'exportation, emploie les deux tiers de la population active et contribue à un tiers du PIB. Cependant, ces performances économiques remarquables reposent sur une agriculture de rente qui se développe au détriment des forêts naturelles, entraînant l'un des taux de déforestation les plus alarmants au monde. Pour faire face à cette situation, l'État ivoirien promeut l'agroforesterie comme solution, en particulier dans le secteur du cacao. Cependant, une analyse fine de l'origine des arbres présents dans les champs suggère que l'agroforesterie en Côte d'Ivoire peut être divisée en deux catégories : l'agroforesterie de reforestation, qui permet de reconstituer le couvert forestier en associant progressivement des arbres aux cacaoyers, et l'agroforesterie de déforestation, qui dégrade et appauvrit la couverture forestière en convertissant les forêts naturelles en systèmes agroforestiers. Il est crucial de distinguer ces deux formes d'agroforesterie afin de développer des politiques qui encouragent la reforestation plutôt que la déforestation. Il est également nécessaire de mettre en place des indicateurs dynamiques qui permettent d'évaluer les trajectoires agroforestières des champs dans le temps et, ainsi, de favoriser un engagement à long terme des agriculteurs dans l'augmentation de la couverture forestière.

Mots-clés : agroforesterie de reforestation, agroforesterie de déforestation, cacaoculture, indicateur, trajectoire, Agro-Forêt, agroforesterie, Côte d'Ivoire.

ABSTRACT

Fostering agroforestry? Lessons from the Republic of Côte d'Ivoire

Promoting the emergence of agroforestry in the Republic of Côte d'Ivoire has become a national priority. The country's agricultural sector generates 70% of export income, employs two-thirds of the working population and contributes one-third of GDP. However, this remarkable economic performance is based on cash crop farming, which has developed at the expense of natural forests, resulting in one of the most alarming deforestation rates in the world. To address this situation, the Ivorian government is promoting agroforestry as a solution, particularly in the cocoa sector. However, a detailed analysis of the origin of the trees present in cropfields suggests that agroforestry in Côte d'Ivoire can be divided into two categories: *reforestation agroforestry*, which restores forest cover by gradually associating trees with cocoa trees, and *deforestation agroforestry*, which degrades and impoverishes forest cover by converting natural forests into agroforestry systems. It is crucial to distinguish between these two forms of agroforestry in order to develop policies that encourage reforestation rather than deforestation. Also essential is to develop and set up dynamic agroforestry monitoring indicators that can assess the agroforestry trajectories of cropfields over time, and thus encourage farmers' long-term commitment to increasing forest cover.

Keywords: deforestation agroforestry, reforestation agroforestry, cocoa farming, indicator, trajectory, Agro-Forest, agroforestry, Côte d'Ivoire.

RESUMEN

¿Promover la agroforestería? Lecciones de Costa de Marfil

La agroforestería en Costa de Marfil se ha convertido en una prioridad nacional. El sector agrícola del país genera el 70 % de los ingresos de exportación, emplea a dos tercios de la población activa y aporta un tercio del PIB. Sin embargo, este notable rendimiento económico se basa en los cultivos comerciales, que se desarrollan a expensas de los bosques naturales, lo que provoca una de las tasas de deforestación más alarmantes del mundo. Para hacer frente a esta situación, el gobierno marfileño promueve la agroforestería como solución, especialmente en el sector del cacao. Sin embargo, un análisis detallado del origen de los árboles presentes en los campos sugiere que la agroforestería en Costa de Marfil puede dividirse en dos categorías: la agroforestería de reforestación, que permite reconstituir la cubierta forestal asociando progresivamente otros árboles con el árbol del cacao, y la agroforestería de deforestación, que degrada y empobrece la cubierta forestal al convertir los bosques naturales en sistemas agroforestales. Es crucial distinguir entre estas dos formas de agroforestería para desarrollar políticas que fomenten la reforestación en lugar de la deforestación. También es necesario establecer indicadores dinámicos para evaluar las trayectorias agroforestales de los campos a lo largo del tiempo, animando así a los agricultores a comprometerse a largo plazo con el aumento de la cubierta forestal.

Palabras clave: agroforestería de regeneración, cultivo del cacao, indicador, trayectoria, bosque agroforestal, agroforestería, Costa de Marfil.

Émergence de l'agroforesterie en priorité nationale

En Côte d'Ivoire, le secteur agricole génère 70 % des recettes d'exportation. Il emploie les deux tiers de la population active et génère un tiers du produit intérieur brut national (PIB). Les classements mondiaux (premier producteur de cacao et d'anacarde) et africains (premier producteur de caoutchouc naturel) de ce pays témoignent de ce dynamisme économique. Le Tableau de bord économique (TBE) (DSCE, 2023) indique un taux de croissance constamment supérieur à la moyenne mondiale : 6,8 % en 2021 contre une moyenne mondiale de 6,2 % ; et 3,6 % contre 3,4 % en 2022. Aussi le PIB par habitant croît-il régulièrement, dépassant le seuil de 2 200 dollars américains (USD) en 2018, puis celui de 2 400 USD depuis décembre 2022 (DSCE, 2023). Cependant, ces remarquables performances reposent sur une agriculture de rente (basée sur l'exportation de produits primaires) qui se développe au détriment des forêts primaires et dont les productions sont, et restent encore, proportionnelles aux superficies cultivées. Il en résulte l'un des taux de déforestation (7,8 millions d'hectares en 1990, 2,8 millions en 2020, soit -64,1 %) les plus alarmants au monde (FAO, 2020). Cette déforestation quasi totale du pays engendre des incertitudes climatiques (notamment pluviométriques) de plus en plus fortes et une insécurité alimentaire (associée aux incertitudes climatiques) dans le contexte d'une démographie galopante (2,9 % entre 2018 et 2021, selon le dernier recensement démographique). Pour faire face, une des solutions promues par l'État ivoirien dans son nouveau Code forestier de 2019 est l'agroforesterie (MINEF, 2019). Aussi convient-il de préciser ce qui se cache derrière le terme d'agroforesterie.

Historiquement, le concept d'agroforesterie est évocateur d'une conciliation ou réconciliation, à bénéfices mutuels, entre les activités agricoles et forestières. Ainsi, dans le mot composé « agroforesterie », l'agriculture (préfixe « agro ») précède la foresterie, *i. e.* l'introduction de pratiques sylvicoles dans des exploitations agricoles pour construire des systèmes agroforestiers (Nair, 1987), où la foresterie assure l'agriculture contre le risque de non-durabilité. Ces systèmes sont communément appelés agroforêts (Penot et Feintrenie, 2014). Toutefois, l'histoire de la cacaoculture ivoirienne (Vroh *et al.*, 2019) invite à préciser le concept pour repositionner le système agroforestier dans sa trajectoire temporelle récente (étant acté que, dans un passé lointain, la forêt constitue l'écosystème initial de la majorité des territoires agricoles actuels). En effet, un système agroforestier n'est, par essence, pas un système statique mais un système dynamique comme tout système écologique. L'observation des trajectoires récentes des systèmes agroforestiers en cacaoculture ivoirienne invite à distinguer deux situations très différentes. Ainsi, la plupart des systèmes sont dominés par des arbres rémanents (issus de la forêt préexistante) et reflètent une agroforesterie de déforestation récente (conversion de forêts naturelles en des systèmes agroforestiers). Dans d'autres systèmes, ces rémanents sont minoritaires et reflètent une agroforesterie

de reforestation récente (conversion d'un champ agricole plein soleil en une culture sous ombrage). Des situations intermédiaires existent, mais elles restent minoritaires (figure 1).

Agroforesterie de reforestation

L'agroforesterie de reforestation pourrait se définir comme le résultat de la conversion d'une culture agricole plein soleil en une culture sous ombrage. Ainsi, un système agroforestier de reforestation, en cacaoculture, s'obtient par l'association progressive, par régénération naturelle et/ou par plantation, d'arbres de manière à les faire coexister harmonieusement avec les cacaoyers. Dans ce schéma, le précédent cultural est une cacaoculture quasi pure, sans aucun ou avec peu d'arbres rémanents (*sensu* N'Guessan *et al.*, 2019). L'agroforesterie de reforestation est ainsi une agroforesterie (Carodenuto, 2019) qui contribue à la reconstruction du couvert forestier. Elle participe à restaurer localement de nombreux services écosystémiques (Tiemann et Ring, 2022), y compris la biodiversité végétale, les stocks de carbone et la ressource en bois d'œuvre (tableau I). Un tel système agroforestier doit être clairement distingué de tout autre système agroforestier ayant une histoire et une trajectoire différentes. En la matière, le nouveau Code forestier ivoirien de 2019 est idoine pour promouvoir l'agroforesterie

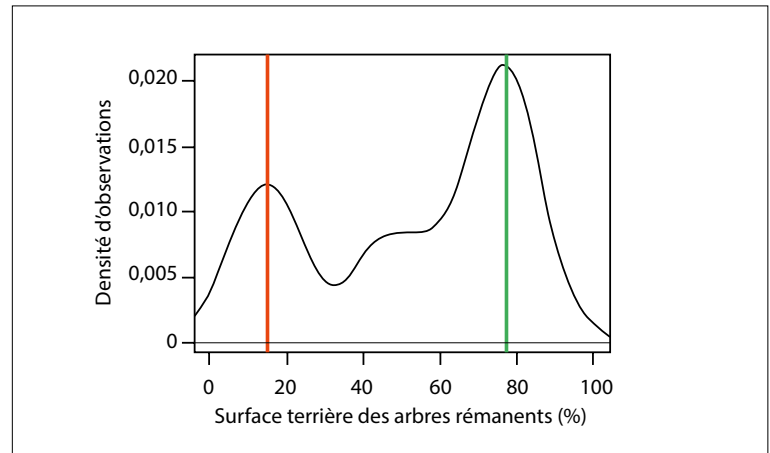


Figure 1.

Densité d'observations de parcelles agroforestières en fonction du pourcentage de surface terrière occupé par les arbres rémanents. Les données proviennent du projet Cocoa4Future (détails dans Kouassi *et al.*, 2023) pour lequel 150 parcelles permanentes ont été installées sur toute la zone cacaoyère ivoirienne. Pour ne retenir que les parcelles agroforestières au sens strict, les parcelles ont été filtrées pour ne garder que les parcelles ayant une surface terrière d'arbres supérieure à 10 m²/ha. Sont représentés en noir, la densité d'observations, en rouge, le maximum local correspondant à une dominance d'arbres non rémanents (agroforesterie de reforestation), en vert, le maximum local correspondant à une dominance d'arbres rémanents (agroforesterie de déforestation).

*Density of observations of agroforestry plots as a function of the percentage of basal area occupied by remnant trees. The data come from the Cocoa4Future project (details in Kouassi *et al.*, 2023), for which 150 permanent plots were set up throughout Côte d'Ivoire's cocoa production zone. To retain only agroforestry plots in the strict definition, the plots were filtered to keep only those with a basal area of trees greater than 10 m²/ha. The observation density is shown in black, the local maximum corresponding to a dominance of non-remnant trees (reforestation agroforestry) is shown in red, and the local maximum corresponding to a dominance of remnant trees (deforestation agroforestry) is shown in green.*

Tableau I.

Différence de caractéristiques entre l'agroforesterie cacao de reforestation (colonne 2) et de déforestation (colonne 3). Les différences sont rapportées pour deux situations typiques de systèmes agroforestiers ayant été construits à partir d'un champ de cacao plein soleil (colonne 2) ou à partir d'une forêt naturelle (colonne 3). Des situations plus complexes existent mais elles restent minoritaires aujourd'hui dans le verger cacao de la Côte d'Ivoire (figure 1).

Caractéristiques	Agroforesterie de reforestation	Agroforesterie de déforestation
Précédent culturel	Cacaoculture en plein soleil	Forêt naturelle
Origine des arbres associés	Régénération naturelle et (trans)plantation*	Arbres rémanents
Impact sur la biodiversité	Gain de biodiversité locale	Perte de biodiversité locale
Impact sur le carbone	Augmentation du stock national de carbone	Diminution du stock national de carbone
Impact sur la ressource en bois	Reconstitution des volumes de bois d'œuvre	Fin programmée de la ressource en bois
Impact paysager	Restauration du couvert forestier	Dégradation du couvert forestier
Approche de développement	Développement durable	Développement non durable

* Le terme de (trans)plantation désigne l'action de planter un arbre qui a été élevé en pépinière (plantation) ou déraciné et déplacé par le planteur au stade plantule (transplantation).

en Côte d'Ivoire, mais il ne permet pas de faire cette distinction actuellement. Il définit l'Agro-Forêt (Article 1 – Titre 1) comme un espace réglementaire situé dans le domaine forestier privé de l'État et dans lequel coexistent des plantations agricoles et des arbres forestiers. Le domaine forestier privé de l'État étant exclusivement constitué de forêts classées et d'aires protégées, les arbres forestiers sont donc essentiellement des arbres rémanents (figure 1). Ainsi, cette définition officielle de l'Agro-Forêt pourrait malencontreusement précipiter, en l'absence de suivi et de contrôle, la conversion des quelques rares îlots forestiers résiduels en des systèmes agroforestiers à l'ivoirienne ; d'où l'intérêt de bien différencier l'agroforesterie de reforestation de l'agroforesterie de déforestation.

Agroforesterie de déforestation

Contrairement à l'agroforesterie de reforestation qui contribue à reconstituer la couverture forestière, l'agroforesterie de déforestation la dégrade et l'appauvrit. En effet, l'agroforesterie de déforestation se définit comme la conversion de forêts naturelles (plus ou moins dégradées) en des systèmes agroforestiers (tableau I). Ce changement d'usage de la terre (Ouattara *et al.*, 2021) suit un processus qui est très bien décrit par Barima *et al.* (2016, 2020). Dans le domaine privé de l'État, notamment, les cacaoculteurs, conscients de l'illégalité de leur présence, s'installent de façon difficilement détectable par les services forestiers. Dans les premières années, ils abattent seulement les petits arbres du sous-bois et procèdent au semis direct des fèves de cacao en pleine terre. Puis, à mesure que les jeunes cacaoyers grandissent sous la cano-

pée forestière, les arbres des étages intermédiaires sont progressivement dévitalisés sur pied par cerclage, écorçage en anneau (action de retirer l'écorce d'un arbre sur toute sa circonférence, à la base de l'arbre ou à hauteur de poitrine – la mort sur pied survient alors par cessation des flux de sève élaborée des feuilles vers les racines si l'on empêche la formation de rejets de souche) jusqu'aux plus gros arbres dominants ; ceci, pour s'adapter graduellement aux besoins en lumière des cacaoyers.

**Photo 2.**

Vue du sous-bois d'une agroforêt à base de cacaoyers en association avec akpi (*Ricinodendron Heudelotii*), palmier à huile (*Elaeis guineensis*), des bananiers plantains (*Musa × paradisiaca*) et ananas (*Ananas comosus*). Yamoussoukro, Côte d'Ivoire, 22 juin 2023.

A view of the understory of an agroforest based on cocoa trees in association with Akpi (*Ricinodendron Heudelotii*), oil palm (*Elaeis guineensis*), plantain (*Musa × paradisiaca*) and pineapple (*Ananas comosus*). Yamoussoukro, Côte d'Ivoire, June 22, 2023.

Photo Irié Casimir Zo-Bi ©.

Il en résulte des systèmes agroforestiers qui, du point de vue des indicateurs couramment utilisés par les agronomes (surface terrière relative, nombre d'arbres à l'hectare), semblent similaires aux systèmes agroforestiers de reforestation si bien qu'il est absolument nécessaire de considérer leurs histoires, ou trajectoires (*sensu* Amani *et al.*, 2022), respectives pour pouvoir les distinguer. Il existe donc une diversité de systèmes agroforestiers dans le verger cacaoyer ivoirien où des cacaoyers coexistent avec des cohortes d'arbres (Sanial *et al.*, 2023) aux histoires très différentes : des arbres rémanents issus de la forêt préexistante et qui n'ont pas été coupés/brûlés lors de la défriche ; des arbres spontanés issus de la régénération naturelle (Doua-Bi *et al.*, 2021) que le planteur a volontairement épargnés lors des entretiens et choisi de laisser grandir naturellement ; des arbres plantés pour produire des biens et services que les deux autres cohortes ne fourniraient pas. La prise en compte du poids relatif de ces trois cohortes d'arbres permet de reconstruire l'histoire de la cacaoyère et sa trajectoire agroforestière (figure 1). Une parcelle agroforestière dominée par des arbres rémanents témoigne ainsi d'un système agroforestier issu de la déforestation. Au contraire, une parcelle agroforestière dominée par des arbres spontanés ou plantés témoigne de la lente construction, par le cacaoculteur, d'un système agroforestier où les arbres ont été activement choisis, entretenus et accompagnés dans leur croissance. Cette grille de lecture permet d'éclairer la situation actuelle du verger cacaoyer ivoirien (Kouassi *et al.*, 2023).

De l'importance des trajectoires agroforestières

Une photographie instantanée, une appréciation ponctuelle ou une mesure sans suivi de l'importance des arbres dans un champ de cacao (photos 1 et 2) ne permet, en général, pas d'en inférer la trajectoire passée et, donc, de récompenser des trajectoires agroforestières vertueuses. En effet, comme montré précédemment, un système agroforestier riche en arbres peut avoir deux origines ou trajectoires diamétralement opposées : être issu de la déforestation et donc s'être créé, en quelque sorte, sur la rente forestière (Léonard et Ibo, 1994), ou être issu de la reforestation et donc être le fruit du travail long et patient du planteur pour sélectionner et/ou planter des arbres dans sa parcelle (Sanial *et al.*, 2021). En conséquence, tous les indicateurs de performance agroforestière ou autres critères de certification qui sont uniquement basés sur la valeur, à un moment donné, de la surface terrière relative des arbres et/ou de la couverture forestière sont, au mieux, inefficaces pour apprécier la trajectoire agroforestière, au pire, risquent d'encourager des comportements peu vertueux. En effet, le moyen le plus rapide et le plus facile d'obtenir un champ de cacao qui passe les seuils d'indicateurs est de créer un nouveau champ sur une ancienne forêt ou d'agrandir son champ sur la forêt adjacente pour inclure quelques gros arbres dans la cacaoyère.

Ces différentes stratégies ont fréquemment été observées sur le terrain par les auteurs. Ainsi, faire la promotion de l'agroforesterie sans considérer les trajectoires agroforestières présente d'importants risques d'augmentation de la déforestation (Angelsen et Kaimowitz, 2004). Il est donc fondamental que les politiques de promotion de l'agroforesterie changent complètement de paradigme pour récompenser les trajectoires vertueuses. Concrètement, cela passe par l'abandon des indicateurs statiques et par le développement d'indicateurs dynamiques (basés sur une comparaison de la valeur de l'indicateur à la valeur précédente obtenue sur le même champ, et non pas à une valeur seuil définie arbitrairement) qui récompensent des évolutions positives du caractère agroforestier. Cela passe très vraisemblablement aussi par une forme de pacte noué entre le planteur et la puissance publique, pacte co-construit et qui matérialise l'engagement, sur plusieurs années, du planteur à augmenter la place des arbres dans son champ. Dans cette perspective, nonobstant la situation de départ, seule serait récompensée, par une prime à l'achat, l'évolution de la couverture forestière dans le temps. Changer de paradigme devient donc une condition *sine qua non* pour que la promotion de l'agroforesterie se développe à travers la promotion d'une réelle agroforesterie de reforestation.

Accès aux données

Les données sont accessibles dans l'entrepôt de données de Zenodo à l'aide du lien Internet suivant : <https://doi.org/10.5281/zenodo.8138694>

En cas d'utilisation de ces données, nous recommandons d'informer les auteurs et de citer l'origine du jeu de données comme suit :

Hérault B., Zo-Bi I. C., 2023. Dataset used in "Fostering Agroforestry - Lessons from Côte d'Ivoire" [Data set]. In Bois et Forêts des Tropiques. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8138694>



Photo 3.

Vue instantanée du sous-bois d'un système agroforestier à base de cacaoyers associés avec des essences forestières à droite (Iroko - *Milicia excelsa*) et fruitières à gauche (Avocatier - *Persea americana*). Snapshot of the undergrowth of an agroforestry system based on cocoa trees combined with forest trees on the right (Iroko - *Milicia excelsa*) and fruit trees on the left (Avocado - *Persea americana*).

Photo I. C. Zo-Bi ©.

Références

- Amani B. H., N'Guessan A. E., Van der Meersch V., Derroire G., Piponiot C., *et al.*, 2022. Lessons from a regional analysis of forest recovery trajectories in West Africa. *Environmental Research Letters*, 17 (11): 115005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac9b4f>
- Angelsen A., Kaimowitz D., 2004. Is agroforestry likely to reduce deforestation? In: Schroth G., da Fonseca G. A. B., Harvey C. A., Gascon C., Vasconcelos H. L., Izac A.-M. N. (eds). *Agroforestry and biodiversity conservation in tropical landscapes*. Washington, DC, USA, Island Press, 87-106. <https://www.cifor.org/knowledge/publication/1534>
- Barima Y. S. S., Kouakou A. T. M., Bamba I., Sangne Y. C., Godron M., *et al.*, 2016. Cocoa crops are destroying the forest reserves of the classified forest of Haut-Sassandra (Ivory Coast). *Global Ecology and Conservation*, 8: 85-98. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2016.08.009>
- Barima Y. S. S., Konan G. D., Kouakou A. T. M., Bogaert J., 2020. Cocoa production and forest dynamics in Ivory Coast from 1985 to 2019. *Land*, 9: 524. <https://doi.org/10.3390/land9120524>
- Carodenuo S., 2019. Governance of zero deforestation cocoa in West Africa: New forms of public-private interaction. *Environmental Policy and Governance*, 29 (1): 55-66. <https://doi.org/10.1002/eet.1841>
- Doua-Bi G. Y., Zo-Bi I. C., Amani B. H., Elogne A. G., N'dja J. K., *et al.*, 2021. Taking advantage of natural regeneration potential in secondary forests to recover commercial tree resources in Côte d'Ivoire. *Forest Ecology and Management*, 493: 119240. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119240>
- DSCE, 2023. Tableau de bord économique n° 005. Abidjan, Côte d'Ivoire, Institut national de la statistique, 15 p. <https://ins.ci/templates/docss/tbe0323.pdf>
- FAO, 2020. Évaluation des ressources forestières mondiales 2020. Rapport Côte d'Ivoire. Rome, Italie, FAO, 55 p. <https://www.fao.org/3/cb0126fr/cb0126fr.pdf>
- Kouassi A. K., Zo-Bi I. C., Aussenac R., Kouamé I. K., Dago M. R., *et al.*, 2023. The great mistake of plantation programs in cocoa agroforests – Let's bet on natural regeneration to sustainably provide timber wood. *Trees, Forests and People*, 12 : 100386. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2023.100386>
- Léonard E., Ibo J., 1994. Appropriation et gestion de la rente forestière en Côte d'Ivoire. *Politique Africaine*, 53 : 25-36. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2023.100386>
- MINEF, 2019. Le Code forestier – Loi n° 2019-675 du 23 juillet 2019. Abidjan, République de Côte d'Ivoire, ministère des Eaux et Forêts, 28 p. <https://eauxetforets.gouv.ci/sites/default/files/communiquelcodeforestier1.pdf>
- N'Guessan A. E., N'dja J. K., Yao O. N., Amani B. H., Gouli R. G., *et al.*, 2019. Drivers of biomass recovery in a secondary forested landscape of West Africa. *Forest Ecology and Management*, 433: 325-331. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.11.021>
- Nair P. K. R., 1987. Agroforestry systems inventory. *Agroforestry Systems*, 5: 301-317. <https://doi.org/10.1007/BF00119128>
- Ouattara T. A., Kouamé F., Zo-Bi I. C., Vaudry R., Grinand C., 2021. Changements d'occupation et d'usage des terres entre 2016 et 2019 dans le Sud-Est de la Côte d'Ivoire : impact des cultures de rente sur la forêt. *Bois et Forêts des Tropiques*, 347 : 91-106. <https://doi.org/10.19182/bft2021.347.a31868>

- Penot E., Feintrenie L., 2014. L'agroforesterie sous climat tropical humide : une diversité de pratiques pour répondre à des objectifs spécifiques et à des contraintes locales. *Bois et Forêts des Tropiques*, 321 : 5-6. <https://doi.org/10.19182/bft2014.321.a31212>
- Sanial E., Rabany C., Rullier N., Ettien R., 2021. Méthode de promotion et de financement de la transition agroforestière en Côte d'Ivoire. *Nitidae*, 1 : 1-5. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36359.32168>
- Sanial E., Ruf F., Louppe D., Mietton M., Hérault B., 2023. Local farmers shape ecosystem service provisioning in West African cocoa agroforests. *Agroforestry Systems*, 97: 401-414. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00723-6>
- Tiemann A., Ring I., 2022. Towards ecosystem service assessment: Developing biophysical indicators for forest ecosystem services. *Ecological Indicators*, 137 (4): 108704. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108704>
- Vroh B. T. A., Abrou N. E. J., Goné Bi Z. B., Adou Y. C. Y., 2019. Système agroforestier à cacaoyers en Côte d'Ivoire : connaissances existantes et besoins de recherche pour une production durable. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 7 (1) : 99-109. <https://ci.chm-cbd.net/fr/documents/systeme-agroforestier-cacaoyers-en-cote-divoire-connaissances-existantes-et-besoins-de>

Zo-Bi *et al.* – Contributions des auteurs

Rôle du contributeur	Noms des auteurs
Conceptualisation	I. C. Zo-Bi, B. Hérault
Gestion des données	I. C. Zo-Bi, B. Hérault
Acquisition du financement	I. C. Zo-Bi, B. Hérault
Enquête et investigation	I. C. Zo-Bi, B. Hérault
Méthodologie	I. C. Zo-Bi, B. Hérault
Gestion de projet	I. C. Zo-Bi, B. Hérault
Ressources	I. C. Zo-Bi, B. Hérault
Supervision	I. C. Zo-Bi, B. Hérault
Validation	I. C. Zo-Bi, B. Hérault
Visualisation	I. C. Zo-Bi, B. Hérault
Écriture – Préparation de l'ébauche originale	I. C. Zo-Bi, B. Hérault
Écriture – Révision et édition	I. C. Zo-Bi, B. Hérault

Bois et Forêts des Tropiques - Revue scientifique du Cirad -
© Bois et Forêts des Tropiques © Cirad



Cirad - Campus international de Baillarguet,
34398 Montpellier Cedex 5, France
Contact : bft@cirad.fr - ISSN : L-0006-579X

Fostering agroforestry? Lessons from The Republic of Côte d'Ivoire



Photo 1.
Cocoa trees under the shade of an Iroko (*Milicia excelsa*), surciming an Avocado (*Persea americana*) well established in the intermediate stratum. Yamoussoukro, Côte d'Ivoire, June 22, 2023.
Photo I. C. Zo-Bi ©.

Irié Casimir Zo-Bi¹
Bruno HÉRAULT^{2,3}

¹ Institut national polytechnique Félix Houphouët-Boigny
(DFR-FOREN/INP-HB)
Département de foresterie et environnement
Yamoussoukro
Côte d'Ivoire

² Cirad
UPR Forêts et Sociétés
34398 Montpellier
France

³ Forêts et Sociétés
Univ Montpellier, Cirad
Montpellier
France

Auteur correspondant / Corresponding author:
Bruno HÉRAULT – bruno.herault@cirad.fr

ORCID



Irié Casimir ZO-BI: [0000-0003-0982-8579](https://orcid.org/0000-0003-0982-8579)



Bruno HÉRAULT: [0000-0002-6950-7286](https://orcid.org/0000-0002-6950-7286)

Doi : 10.19182/bft2023.356.a37234 – Droit d'auteur © 2023, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 28 mars 2023 ;
date d'acceptation : 29 juin 2023 ; date de publication : 1^{er} juillet 2023.



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

Citer l'article / To cite the article

Zo-Bi I. C., Héroult B., 2023. Fostering agroforestry? Lessons from the Republic of Côte d'Ivoire. Bois et Forêts des Tropiques, 356: 99-104. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2023.356.a37234>

RÉSUMÉ

Promouvoir l'agroforesterie ? Les leçons de la Côte d'Ivoire

L'émergence de l'agroforesterie en Côte d'Ivoire est devenue une priorité nationale. Le secteur agricole du pays génère 70 % des recettes d'exportation, emploie les deux tiers de la population active et contribue à un tiers du PIB. Cependant, ces performances économiques remarquables reposent sur une agriculture de rente qui se développe au détriment des forêts naturelles, entraînant l'un des taux de déforestation les plus alarmants au monde. Pour faire face à cette situation, l'État ivoirien promeut l'agroforesterie comme solution, en particulier dans le secteur du cacao. Cependant, une analyse fine de l'origine des arbres présents dans les champs suggère que l'agroforesterie en Côte d'Ivoire peut être divisée en deux catégories : l'agroforesterie de reforestation, qui permet de reconstituer le couvert forestier en associant progressivement des arbres aux cacaoyers, et l'agroforesterie de déforestation, qui dégrade et appauvrit la couverture forestière en convertissant les forêts naturelles en systèmes agroforestiers. Il est crucial de distinguer ces deux formes d'agroforesterie afin de développer des politiques qui encouragent la reforestation plutôt que la déforestation. Il est également nécessaire de mettre en place des indicateurs dynamiques qui permettent d'évaluer les trajectoires agroforestières des champs dans le temps et, ainsi, de favoriser un engagement à long terme des agriculteurs dans l'augmentation de la couverture forestière.

Mots-clés : agroforesterie de reforestation, agroforesterie de déforestation, cacaoculture, indicateur, trajectoire, Agro-Forêt, agroforesterie, Côte d'Ivoire.

ABSTRACT

Fostering agroforestry? Lessons from the Republic of Côte d'Ivoire

Promoting the emergence of agroforestry in the Republic of Côte d'Ivoire has become a national priority. The country's agricultural sector generates 70% of export income, employs two-thirds of the working population and contributes one-third of GDP. However, this remarkable economic performance is based on cash crop farming, which has developed at the expense of natural forests, resulting in one of the most alarming deforestation rates in the world. To address this situation, the Ivorian government is promoting agroforestry as a solution, particularly in the cocoa sector. However, a detailed analysis of the origin of the trees present in cropfields suggests that agroforestry in Côte d'Ivoire can be divided into two categories: *reforestation agroforestry*, which restores forest cover by gradually associating trees with cocoa trees, and *deforestation agroforestry*, which degrades and impoverishes forest cover by converting natural forests into agroforestry systems. It is crucial to distinguish between these two forms of agroforestry in order to develop policies that encourage reforestation rather than deforestation. Also essential is to develop and set up dynamic agroforestry monitoring indicators that can assess the agroforestry trajectories of cropfields over time, and thus encourage farmers' long-term commitment to increasing forest cover.

Keywords: deforestation agroforestry, reforestation agroforestry, cocoa farming, indicator, trajectory, Agro-Forest, agroforestry, Côte d'Ivoire.

RESUMEN

¿Promover la agroforestería? Lecciones de Costa de Marfil

La agroforestería en Costa de Marfil se ha convertido en una prioridad nacional. El sector agrícola del país genera el 70 % de los ingresos de exportación, emplea a dos tercios de la población activa y aporta un tercio del PIB. Sin embargo, este notable rendimiento económico se basa en los cultivos comerciales, que se desarrollan a expensas de los bosques naturales, lo que provoca una de las tasas de deforestación más alarmantes del mundo. Para hacer frente a esta situación, el gobierno marfileño promueve la agroforestería como solución, especialmente en el sector del cacao. Sin embargo, un análisis detallado del origen de los árboles presentes en los campos sugiere que la agroforestería en Costa de Marfil puede dividirse en dos categorías: la agroforestería de reforestación, que permite reconstituir la cubierta forestal asociando progresivamente otros árboles con el árbol del cacao, y la agroforestería de deforestación, que degrada y empobrece la cubierta forestal al convertir los bosques naturales en sistemas agroforestales. Es crucial distinguir entre estas dos formas de agroforestería para desarrollar políticas que fomenten la reforestación en lugar de la deforestación. También es necesario establecer indicadores dinámicos para evaluar las trayectorias agroforestales de los campos a lo largo del tiempo, animando así a los agricultores a comprometerse a largo plazo con el aumento de la cubierta forestal.

Palabras clave: agroforestería de regeneración, cultivo del cacao, indicador, trayectoria, bosque agroforestal, agroforestería, Costa de Marfil.

Making agroforestry a national priority

In Côte d'Ivoire, the agricultural sector generates 70% of export revenues. It employs two-thirds of the active population and contributes one-third of the Gross domestic product (GDP). The country's global (1st producer of cocoa and cashewnuts) and African (1st producer of natural rubber) rankings testify to this economic dynamism. The Economic Dashboard (ED) (DSCE, 2023) indicates a growth rate consistently higher than the global average: 6.8% in 2021 compared to a global average of 6.2%; and 3.6% compared to 3.4% in 2022. Additionally, the per capita GDP has been steadily increasing, surpassing the threshold of 2,200 US dollars (USD) in 2018 and reaching 2,400 USD since December 2022 (DSCE, 2023). However, these remarkable performances rely on cash crop agriculture (based on the export of primary products), which is developing at the expense of natural forests, and whose production is still proportional to cultivated areas. As a result, one of the world's most alarming deforestation rates (7.8 million hectares in 1990; 2.8 million hectares in 2020, representing a -64.1% change) is observed in the country (FAO, 2020). This near-total deforestation of the country leads to increasingly strong climate uncertainties (especially rainfall patterns) and food insecurity (associated with climate uncertainties) in the context of a booming population (2.9% between 2018 and 2021 according to the latest population census). To address these issues, one of the solutions promoted by the Ivorian government in its new 2019 forestry code is agroforestry (MINEF, 2019). It is important to clarify what lies behind the term "agroforestry". Historically, the concept of agroforestry evokes the reconciliation or mutual benefit between agricultural and forestry activities. Thus, in the compound word "agroforestry", agriculture (the prefix "agro") precedes forestry, i.e., the introduction of silvicultural practices into agricultural farms to build agroforestry systems (Nair, 1987) where forestry safeguards agriculture against the risk of non-sustainability. These systems are commonly referred to as agroforests (Penot and Feintrenie, 2014). However, the history of Ivorian cocoa farming (Vroh *et al.*, 2019) invites us to specify the concept in order to reposition the agroforestry system in its recent temporal trajectory (acknowledging that, in the distant past, forests constituted the initial ecosystem of the majority of current agricultural territories). Indeed, an agroforestry system is inherently not a static system but a dynamic one, like any ecological system. The observation of recent trajectories of agroforestry systems in Ivorian cocoa farming highlights two very different situations. In this way, most systems are dominated by remnant trees (coming from the pre-existing forest) and reflect a recent deforestation agroforestry (conversion of natural forests into agroforestry systems). In other systems, these remnants are in the minority and reflect a recent reforestation agroforestry (conversion of a full-sun agricultural field into a shaded crop). Intermediate situations exist, but they remain in the minority (figure 1).

Reforestation agroforestry

Reforestation agroforestry could be defined as the result of converting a full-sun agricultural crop into a shaded crop. Thus, a reforestation agroforestry system, in cocoa farming, is achieved by the gradual association, through natural regeneration and/or planting, of trees in a way that allows them to coexist harmoniously with cocoa trees. In this scheme, the previous crop is a nearly pure cocoa crop, with few or no remnant trees (as per N'Guesan *et al.*, 2019). Reforestation agroforestry is therefore an agroforestry approach (Carodenuto, 2019) that contributes to the restoration of forest cover. It helps to locally restore various ecosystem services (Tiemann and Ring, 2022), including plant biodiversity, carbon stocks, and timber resources (table I). Such an agroforestry system must be clearly distinguished from any other agroforestry system with a different history and trajectory. In this regard, the new Ivorian forestry code of 2019 is suitable for promoting agroforestry in Côte d'Ivoire, but it currently does not allow for this distinction. It defines Agro-Forest (Article 1 – Title 1) as a regulated area located within the private forest domain of the state, where agricultural plantations and forest trees coexist. Since the private forest domain of the state consists exclusively of classified forests and protected areas, the forest trees mainly refer to remnant trees (figure 1). Thus, this official definition of Agro-Forest could inadvertently accelerate, in the absence of monitoring and control, the conversion of the few remaining forest patches into Ivorian-style agroforestry systems. Hence, it is important to differentiate reforestation agroforestry from deforestation agroforestry.

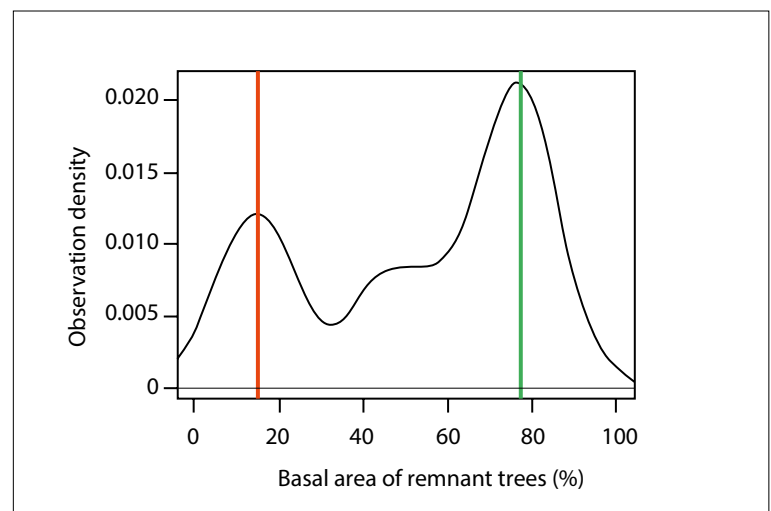


Figure 1.

Density of observations of agroforestry plots as a function of the percentage of basal area occupied by remnant trees. The data come from the Cocoa4Future project (details in Kouassi *et al.*, 2023), for which 150 permanent plots were set up throughout Côte d'Ivoire's cocoa production zone. To retain only agroforestry plots in the strict definition, the plots were filtered to keep only those with a basal area of trees greater than 10 m²/ha. The observation density is shown in black, the local maximum corresponding to a dominance of non-remnant trees (reforestation agroforestry) is shown in red, and the local maximum corresponding to a dominance of remnant trees (deforestation agroforestry) is shown in green.

Table 1.

Differences in characteristics between reforestation (column 2) and deforestation (column 3) agroforestry systems. The differences are reported for two typical situations of agroforestry systems that have been built from a full-sun cocoa field (column 2) or from a natural forest (column 3). More complex situations do exist, but they are still in the minority in Côte d'Ivoire's cocoa plantations (figure 1).

Characteristics	Reforestation Agroforestry	Deforestation Agroforestry
Previous land use	Full sun cocoa farming	Natural forest
Origin of associated trees	Natural regeneration & (trans)planting*	Remnant trees
Impact on biodiversity	Gain in local biodiversity	Loss in local biodiversity
Impact on carbon	Increase in national carbon stock	Decrease in national carbon stock
Impact on timber resources	Reconstitution of timber volumes	Timber resources expected to come to an end
Impact on landscape	Restoration of forest cover	Degradation of forest cover
Development approach	Sustainable	Unsustainable

* The term (trans)planting refers to the action of planting a tree that has been raised in a nursery (planting) or uprooted and moved by the planter at the seedling stage (transplanting).

Deforestation agroforestry

Unlike reforestation agroforestry, which contributes to the restoration of forest cover, deforestation agroforestry degrades and impoverishes it. Deforestation agroforestry is defined as the conversion of natural forests (more or less degraded) into agroforestry systems (table 1). This peculiar land-use change (Ouattara *et al.*, 2021) follows a process that is well described by Barima *et al.* (2016, 2020). In the state's private domain, cocoa farmers, aware of the illegality of their presence, settle in a way that is difficult to detect by forest services. In the early years, they only fell small understory trees and directly sow cocoa beans in the open ground. As the young cocoa trees grow under the forest canopy, the intermediate-level trees are gradually weakened by girdling, ring-barking, or girdling (removing the bark from a tree around its entire circumference, at the base of the tree or at breast height, this results in death on the standing tree, as the flow of sap from the leaves to the roots is interrupted, preventing the formation of stump sprouts) until the larger dominant trees are affected.

This is done gradually to adapt to the light requirements of the cocoa trees. The result is agroforestry systems that, based on indicators commonly used by agronomists (relative basal area, number of trees per hectare), appear similar to reforestation agroforestry systems. Therefore, it is absolutely necessary to consider their respective histories or trajectories (*sensu* Amani *et al.*, 2022) in order to distinguish them. There is a diversity of agroforestry systems in

**Photo 2.**

A view of the understory of an agroforest based on cocoa trees in association with Akpi (*Ricinodendron Heudelotii*), oil palm (*Elaeis guineensis*), plantain (*Musa × paradisiaca*) and pineapple (*Ananas comosus*). Yamoussoukro, Côte d'Ivoire, June 22, 2023. Photo I. C. Zo-Bi ©.

the Ivorian cocoa orchard where cocoa trees coexist with cohorts of trees (Sanial *et al.*, 2023) with very different histories: (i) remnant trees from the pre-existing forest that were not cut/burnt during forest clearing, (ii) spontaneous trees from natural regeneration (Doua-Bi *et al.*, 2021) that the farmer intentionally spared during maintenance and allowed to grow naturally, and (iii) planted trees for producing goods and services that the other two cohorts would not provide. Considering the relative weight of these three cohorts of trees allows for reconstructing the history of the cocoa plantation and its agroforestry trajectory (figure 1). An agroforestry plot dominated by remnant trees thus indicates an agroforestry system resulting from deforestation. Conversely, an agroforestry plot dominated by spontaneous or planted trees reflects the slow construction, by the cocoa farmer, of an agroforestry system where trees have been actively chosen, maintained, and supported in their growth. This reading grid sheds light on the current situation of the Ivorian cocoa orchard (Kouassi *et al.*, 2023).

The importance of agroforestry trajectories

A snapshot photo, a punctual assessment, or a measurement without monitoring in time the importance of trees in a cocoa field (photos 1 and 2) generally does not allow for the inference of its past trajectory and therefore does not reward virtuous agroforestry trajectories. As previously shown, a tree-rich agroforestry system can have two diametrically opposed origins or trajectories: (i) it can stem from deforestation and thus be created, in a way, on forest rent (Léonard and Ibo, 1994) or (ii) it can result from reforestation and therefore be the fruit of the long and patient work of the farmer to select and/or plant trees in their plot (Sanial *et al.*, 2021). Consequently, all indicators of agroforestry performance or other certification criteria that are solely based on the value, at a given time, of the relative basal area of trees and/or forest cover are at best ineffective in assessing the agroforestry trajectory and at worst risk encouraging unvirtuous behaviors. Indeed, the fastest and easiest way to meet the indicator thresholds in a cocoa field is (i) to establish a new field on old forest land or (ii) to expand one's field into the adjacent forest to include a few large trees in the cocoa plantation. These different strategies have been frequently observed in the field by the authors. Thus, promoting agroforestry without considering agroforestry trajectories carries significant risks of increasing deforestation (Angelsen and Kai-

mowitz, 2004). It is therefore essential for agroforestry promotion policies to completely change their paradigm to reward virtuous trajectories. In concrete terms, this involves abandoning static indicators and developing dynamic indicators (based on a comparison of the indicator value with the previous value obtained in the same field, rather than an arbitrarily defined threshold value) that reward positive evolutions in the agroforestry character. This likely also involves a form of agreement made between the farmer and the public authority, a co-constructed pact that materializes the farmer's commitment, over several years, to increase the presence of trees in their field. In this perspective, regardless of the initial situation, only the evolution of forest cover over time would be rewarded with a purchase premium. Changing the paradigm thus becomes a necessary condition for agroforestry promotion to develop through the promotion of genuine reforestation-based agroforestry.

Data access

The data are accessible on the Zenodo data warehouse with the following Internet link: <https://doi.org/10.5281/zenodo.8138694>

In case of using this data, we recommend to inform the authors and cite the origin of the dataset as following:

Héroult B., Zo-Bi I. C., 2023. Dataset used in "Fostering Agroforestry - Lessons from Côte d'Ivoire" [Data set]. In Bois et Forêts des Tropiques. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8138694>



Photo 3.

Snapshot of the undergrowth of an agroforestry system based on cocoa trees combined with forest trees on the right (Iroko - *Milicia excelsa*) and fruit trees on the left (Avocado - *Persea americana*). Photo I. C. Zo-Bi ©.

Références

- Amani B. H., N'Guessan A. E., Van der Meersch V., Derroire G., Piponiot C., *et al.*, 2022. Lessons from a regional analysis of forest recovery trajectories in West Africa. *Environmental Research Letters*, 17 (11): 115005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac9b4f>
- Angelsen A., Kaimowitz D., 2004. Is agroforestry likely to reduce deforestation? In: Schroth G., da Fonseca G. A. B., Harvey C. A., Gascon C., Vasconcelos H. L., Izac A.-M. N. (eds). *Agroforestry and biodiversity conservation in tropical landscapes*. Washington, DC, USA, Island Press, 87-106. <https://www.cifor.org/knowledge/publication/1534>
- Barima Y. S. S., Kouakou A. T. M., Bamba I., Sangne Y. C., Godron M., *et al.*, 2016. Cocoa crops are destroying the forest reserves of the classified forest of Haut-Sassandra (Ivory Coast). *Global Ecology and Conservation*, 8: 85-98. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2016.08.009>
- Barima Y. S. S., Konan G. D., Kouakou A. T. M., Bogaert J., 2020. Cocoa production and forest dynamics in Ivory Coast from 1985 to 2019. *Land*, 9: 524. <https://doi.org/10.3390/land9120524>
- Carodenuo S., 2019. Governance of zero deforestation cocoa in West Africa: New forms of public-private interaction. *Environmental Policy and Governance*, 29 (1): 55-66. <https://doi.org/10.1002/eet.1841>
- Doua-Bi G. Y., Zo-Bi I. C., Amani B. H., Elogne A. G., N'dja J. K., *et al.*, 2021. Taking advantage of natural regeneration potential in secondary forests to recover commercial tree resources in Côte d'Ivoire. *Forest Ecology and Management*, 493: 119240. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119240>
- DSCE, 2023. Tableau de bord économique n° 005. Abidjan, Côte d'Ivoire, Institut national de la statistique, 15 p. <https://ins.ci/templates/docss/tbe0323.pdf>
- FAO, 2020. Évaluation des ressources forestières mondiales 2020. Rapport Côte d'Ivoire. Rome, Italie, FAO, 55 p. <https://www.fao.org/3/cb0126fr/cb0126fr.pdf>
- Kouassi A. K., Zo-Bi I. C., Aussenac R., Kouamé I. K., Dago M. R., *et al.*, 2023. The great mistake of plantation programs in cocoa agroforests – Let's bet on natural regeneration to sustainably provide timber wood. *Trees, Forests and People*, 12 : 100386. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2023.100386>
- Léonard E., Ibo J., 1994. Appropriation et gestion de la rente forestière en Côte d'Ivoire. *Politique Africaine*, 53 : 25-36. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2023.100386>
- MINEF, 2019. Le Code forestier – Loi n° 2019-675 du 23 juillet 2019. Abidjan, République de Côte d'Ivoire, ministère des Eaux et Forêts, 28 p. <https://eauxetforets.gouv.ci/sites/default/files/communiquelcodeforestier1.pdf>
- N'Guessan A. E., N'dja J. K., Yao O. N., Amani B. H., Gouli R. G., *et al.*, 2019. Drivers of biomass recovery in a secondary forested landscape of West Africa. *Forest Ecology and Management*, 433: 325-331. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.11.021>
- Nair P. K. R., 1987. Agroforestry systems inventory. *Agroforestry Systems*, 5: 301-317. <https://doi.org/10.1007/BF00119128>
- Ouattara T. A., Kouamé F., Zo-Bi I. C., Vaudry R., Grinand C., 2021. Changements d'occupation et d'usage des terres entre 2016 et 2019 dans le Sud-Est de la Côte d'Ivoire : impact des cultures de rente sur la forêt. *Bois et Forêts des Tropiques*, 347 : 91-106. <https://doi.org/10.19182/bft2021.347.a31868>

- Penot E., Feintrenie L., 2014. L'agroforesterie sous climat tropical humide : une diversité de pratiques pour répondre à des objectifs spécifiques et à des contraintes locales. *Bois et Forêts des Tropiques*, 321 : 5-6. <https://doi.org/10.19182/bft2014.321.a31212>
- Sanial E., Rabany C., Rullier N., Ettien R., 2021. Méthode de promotion et de financement de la transition agroforestière en Côte d'Ivoire. *Nitidae*, 1 : 1-5. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36359.32168>
- Sanial E., Ruf F., Louppe D., Mietton M., Hérault B., 2023. Local farmers shape ecosystem service provisioning in West African cocoa agroforests. *Agroforestry Systems*, 97: 401-414. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00723-6>
- Tiemann A., Ring I., 2022. Towards ecosystem service assessment: Developing biophysical indicators for forest ecosystem services. *Ecological Indicators*, 137 (4): 108704. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108704>
- Vroh B. T. A., Abrou N. E. J., Goné Bi Z. B., Adou Y. C. Y., 2019. Système agroforestier à cacaoyers en Côte d'Ivoire : connaissances existantes et besoins de recherche pour une production durable. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 7 (1) : 99-109. <https://ci.chm-cbd.net/fr/documents/systeme-agroforestier-cacaoyers-en-cote-divoire-connaissances-existantes-et-besoins-de>

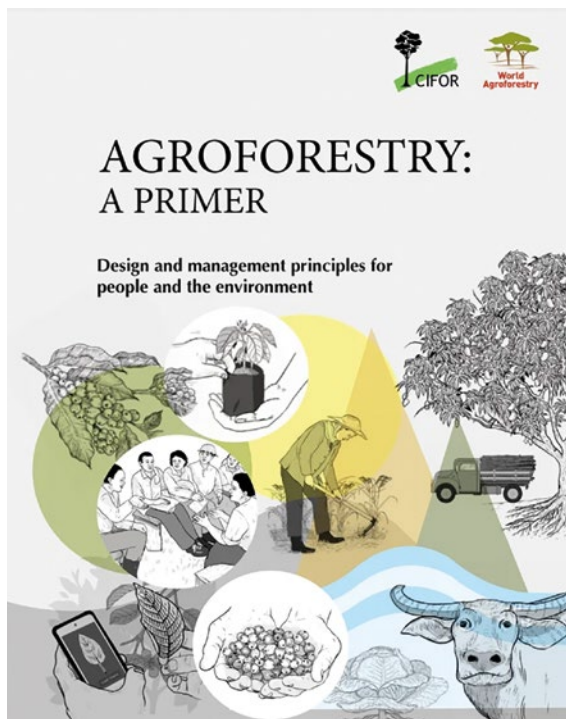
Zo-Bi *et al.* – Author's contributions

Contributor role	Contributor names
Conceptualization	I. C. Zo-Bi, B. Hérault
Data Curation	I. C. Zo-Bi, B. Hérault
Funding Acquisition	I. C. Zo-Bi, B. Hérault
Investigation	I. C. Zo-Bi, B. Hérault
Methodology	I. C. Zo-Bi, B. Hérault
Project Administration	I. C. Zo-Bi, B. Hérault
Resources	I. C. Zo-Bi, B. Hérault
Supervision	I. C. Zo-Bi, B. Hérault
Validation	I. C. Zo-Bi, B. Hérault
Visualization	I. C. Zo-Bi, B. Hérault
Writing – Original Draft Preparation	I. C. Zo-Bi, B. Hérault
Writing – Review & Editing	I. C. Zo-Bi, B. Hérault

Bois et Forêts des Tropiques – Revue scientifique du Cirad -
© Bois et Forêts des Tropiques © Cirad



Cirad - Campus international de Baillarguet,
34398 Montpellier Cedex 5, France
Contact : bft@cirad.fr - ISSN : L-0006-579X



GASSNER A., DOBIE P., 2022.

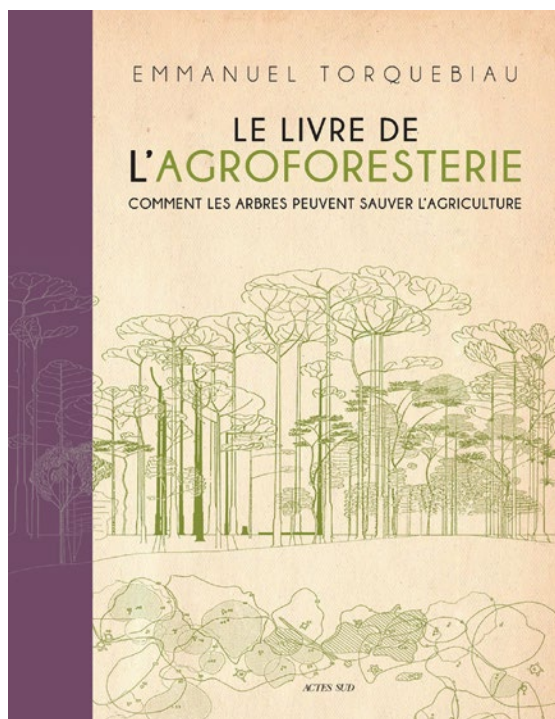
AGROFORESTRY: A PRIMER – DESIGN AND MANAGEMENT PRINCIPLES FOR PEOPLE AND THE ENVIRONMENT

INDONESIA-KENYA, ICRAF-CIFOR, 181 P.

Conventional agriculture is very productive. But high productivity comes at a cost: soil that is depleted or eroded, watercourses that are polluted or drying up, and a food system that produces 20-40% of greenhouse gas emissions. Many people now agree that we urgently need to transform the food system, including agriculture. Agroforestry, as a nature-based approach to production and land use, will play an important role in this transformation. Agroforestry is not new; farmers have practised it for thousands of years, and scientists have recognized it since the 1970s as a productive and ecologically sustainable form of agriculture and land use. But now agroforestry is suddenly at centre stage; it is promoted as a land-use strategy to support climate change mitigation and climate change adaptation, biodiversity conservation, sustainable agriculture and other goals. Many organizations recommend or use it as a tool for restoring ecosystems – not only agricultural ones, but also forest landscapes. Although not a cure-all, agroforestry has great potential to contribute to all the goals mentioned above. However, agroforestry is not just a matter of adding trees to farms. To realize its potential, practitioners need to understand its principles. *Agroforestry: A primer* is a guide to agroforestry principles and concepts – and how to use them effectively.

Adapted from the publisher's abstract.

Jl. CIFOR, Situ Gede, Bogor Barat 16115, Indonesia.
United Nations Avenue, Gigiri, PO Box 30677, Nairobi, 00100, Kenya.
cifor-icraf.org
<https://doi.org/10.5716/cifor-icraf/BK.25114>



TORQUEBIAU É., 2022

LE LIVRE DE L'AGROFORESTERIE : COMMENT LES ARBRES PEUVENT SAUVER L'AGRICULTURE

FRANCE, ACTES SUD, 304 P.

L'agroforesterie, association d'arbres à des cultures ou de l'élevage, se pose désormais en alternative à l'agriculture industrielle. Ses principaux atouts sont la protection du sol, de l'eau et de la biodiversité, tout en maintenant une production agricole, et son rôle pour atténuer le changement climatique ou s'y adapter, sans oublier les multiples productions des arbres (bois, fruits, fourrage, médicaments, etc.). Retours d'expérience et données scientifiques sont maintenant disponibles mais il n'existait pas à ce jour d'ouvrage synthétique en français sur ce sujet. Mettre cette information à la disposition d'un large public afin d'encourager cette pratique innovante et mal connue : tel est le but de ce livre, afin de susciter de nouvelles initiatives et d'aider au changement. D'une lecture facile et incluant beaucoup d'exemples, accompagné d'une riche iconographie, d'un index détaillé et de nombreuses références scientifiques, *Le Livre de l'agroforesterie* permettra à tous, agriculteurs, techniciens, étudiants, chercheurs ou tout simplement curieux, de découvrir cette pratique et d'approfondir leurs connaissances.

Adapté du résumé de l'éditeur.

Actes Sud, 18 rue Séguier, 75006 Paris, France.
www.actes-sud.fr

ISBN: 978-2-87614-801-7 (PDF)
ISBN: 978-2-87614-800-0 (relié)