# THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEURE DE L'INSTUTUT AGRO MONTPELLER ET DE L'UNIVERSITE DE MONTPELLIER

**En Sciences Agronomiques**

**École doctorale GAIA – Biodiversité, Agriculture, Alimentation, Environnement, Terre, Eau**
**Portée par**

**Unité mixte de recherche SENS – Savoirs, ENvironnement et Sociétés**

# Dynamiques de l'agrobiodiversité dans les paysages agroforestiers de Vavatenina à Madagascar

## Études des pratiques, des connaissances paysannes et des réseaux d'échange dans un contexte de changements

**Présentée par Juliette MARIEL**
**Le 20 mai 2022**

**Sous la co-direction de Stéphanie M. CARRIÈRE et Vanesse LABEYRIE**

**Devant le jury composé de**

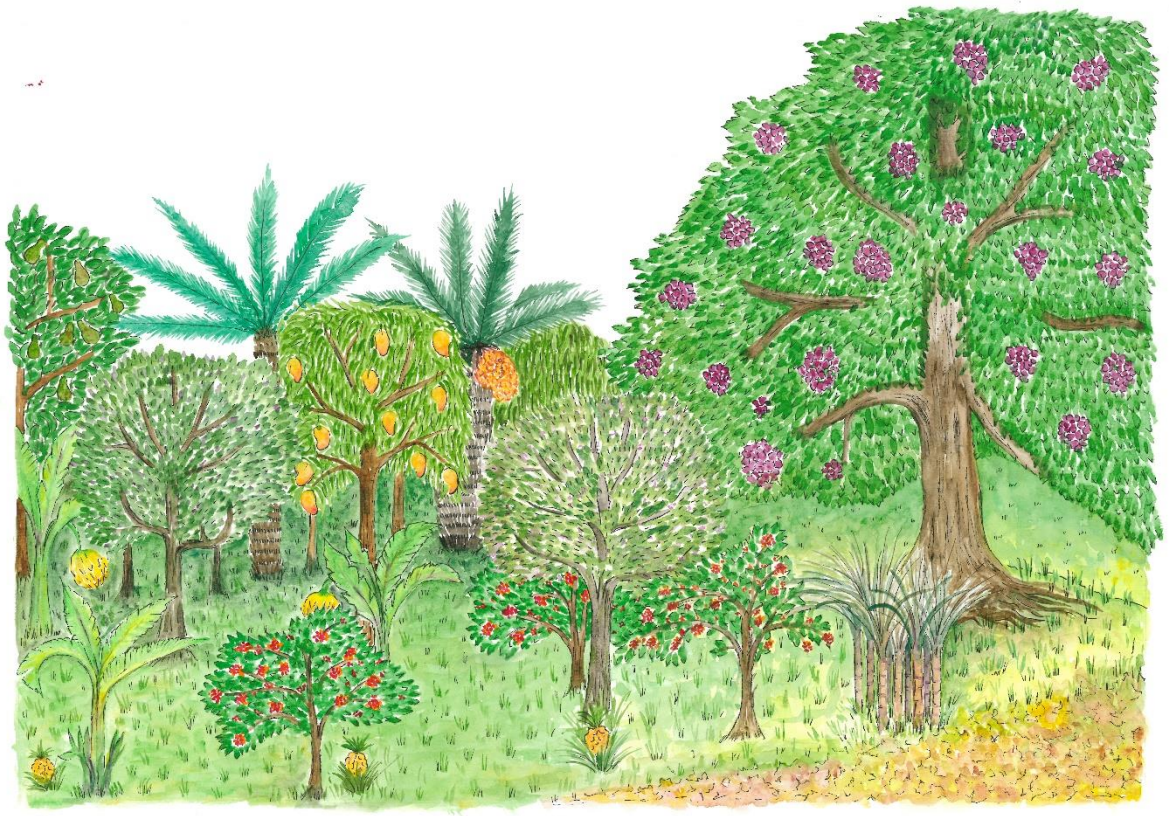
| | |
|---|---|
| Stéphanie M. Carrière, Chercheure HDR, IRD, UMR SENS | Directrice de thèse |
| Victoria E. REYES-GARCÍA, ICREA Research Professor, ICTA, Université Autonome de Barcelone | Rapporteure |
| Julie ZÄHRINGER, Professor, Université de Berne, Centre for Development and Environment | Rapporteure |
| Christine RAIMOND, Directrice de recherche, CNRS, UMR PRODIG | Présidente du jury |
| Sylvie GUILLERME, Directrice de recherche, CNRS, UMR GEODE | Membre du jury |
| Bruno RAPIDEL, Chercheur HDR, CIRAD, UMR ABSys | Membre du jury |
| Dominic MARTIN, Chercheur, Université de Zurich, Department of Geography | Membre invité du jury |
| Vanesse LABEYRIE, Chercheure, CIRAD, UMR SENS | Encadrante |

UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

L'INSTITUT agro Montpellier

# Dynamiques de l'agrobiodiversité dans les paysages agroforestiers de Vavatenina à Madagascar

## Études des pratiques, des connaissances paysannes et des réseaux d'échange dans un contexte de changements



*Septembre 2018 – Mars 2022, Juliette Mariel*



# Résumé


♦ **Résumé**

Les mosaïques paysagères des régions tropicales humides subissent depuis le milieu du 20ème siècle d'importants changements socio-écologiques qui menacent la résilience des agricultures familiales. Face à ces changements, les paysan.ne.s de certaines régions ont diversifié leurs systèmes agricoles en développant notamment des agroforêts (associations d'arbres avec d'autres espèces non pérennes et/ou des animaux, dans l'espace et dans le temps). Iels mobilisent pour cela la diversité végétale, cultivée ou non, et développent différents modes de gestion de cette agrobiodiversité. Ce travail de recherche vise à analyser ces dynamiques agroforestières au travers d'un cas d'étude situé au sein des paysages de la côte nord-est de Madagascar qui témoignent d'une évolution récente depuis une agriculture de subsistance reposant sur l'abattis-brûlis vers une agroforesterie complexe et multi-étagée. Articulée autour de trois parties, ma thèse discute des enjeux de résilience des agricultures familiales en analysant les modes locaux de gestion de l'agrobiodiversité et leurs évolutions en réponse aux changements.

La première partie repose sur des travaux de cartographie des modes d'usage des terres qui ont permis de caractériser dans l'espace et dans le temps les dynamiques agroforestières, et d'en analyser les facteurs socio-économiques et physiques. Ces travaux montrent notamment que l'émergence de cette pratique est liée aux évolutions des stratégies paysannes en réponse à divers changements (baisse de la fertilité, variation des prix, croissance démographique entre autres). L'agroforesterie occupe aujourd'hui une surface importante dans les paysages, sa répartition spatiale est notamment liée à la topographie et elle contribue, avec la diversité des autres usages des terres, à l'hétérogénéité paysagère.

En prenant l'exemple d'un village, la seconde partie étudie la gestion locale de l'agrobiodiversité en analysant la composition en espèces des agroforêts à girofliers et leur organisation spatiale, ainsi que les connaissances paysannes sur les interactions agrobiodiversité-milieu qui sous-tendent ces pratiques. Elle montre que les paysan.ne.s gèrent une riche agrobiodiversité qui est associée à de multiples fonctions, et qui est organisée spatialement selon la topographie, le sol et les interactions espèces-milieu. Les connaissances paysannes permettent de valoriser les conditions hétérogènes du milieu, de favoriser les synergies entre espèces, et de réaliser des compromis entre les différentes contributions que leur apporte l'agrobiodiversité.

Enfin, la troisième partie analyse les modes d'accès des paysan.ne.s aux propagules de plantes cultivées et aux connaissances qui s'y rattachent. Cette partie discute notamment du rôle des plantes et des connaissances exogènes (extérieures au village d'étude) dans les dynamiques agroforestières, et leurs implications pour la résilience des agricultures familiales. Elle met en évidence que pour maintenir et faire évoluer l'agrobiodiversité, les paysan.ne.s utilisent notamment leurs réseaux relationnels au sein

du village et au-delà. Ces derniers leur permettent par exemple d'observer les pratiques d'autres paysan.ne.s et de faire évoluer leurs pratiques par mimétisme.

Les dynamiques agroforestières décrites dans cette thèse soulignent les capacités d'adaptation des agricultures familiales, condition *sine qua non* de leur résilience. Les modes de gestion locaux de l'agrobiodiversité spécifiques aux différentes échelles présentent un grand potentiel pour la gestion durable des agroforêts et pour la restauration des paysages dégradés de ces régions tropicales. Construite autour d'un dialogue permanent entre les disciplines et entre les connaissances scientifiques et paysannes, cette thèse s'inscrit dans une perspective de co-construction de paysages agroforestiers souhaitables et résilients, et appelle à la reconnaissance des pratiques et des connaissances locales.

# Abstract


♦ **Abstract**

Since the middle of the 20th century, the landscape mosaics of the tropical regions have been undergoing socio-ecological changes that threaten the resilience of small-scale agriculture. In response to these changes, farmers in some regions have diversified their cropping systems by developing agroforests (associations of trees with other non-perennial species and/or animals, in space and time). To do so, they use plant diversity, whether cultivated or not, and develop different agrobiodiversity management practices that are adapted to socioeconomic and biophysical contexts. My research aims to analyze these agroforestry dynamics implemented by farmers with a case study in the landscapes of the North-East coast of Madagascar, which show a recent evolution from subsistence agriculture based on slash-and-burn cultivation to complex and multistage agroforestry. The three sections of my thesis study different components of the local agrobiodiversity management (farmers' practices and knowledge, circulation network) and different scales (plot, landscape), and discuss how agrobiodiversity contributes to the resilience of small-scale agriculture to different kinds of change.

The first section of my thesis is based on the mapping of land use patterns, which allowed us to characterize the spatial and temporal dynamics of agroforestry and to analyze their socio-economic and physical drivers. I show that the emergence of this practice is linked to changes in farmers' strategies in response to various changes (declining fertility, price variations, population growth, etc.). Today, agroforests cover an important surface in landscapes, their spatial distribution is closely related to topography and they contribute to landscape heterogeneity.

Taking the example of a village, the second section studies the local management of agrobiodiversity by analyzing the species composition of clove-based agroforests and their spatial organization, as well as farmers' knowledge underlying these practices. I show that farmers manage a rich agrobiodiversity associated with multiple functions, and spatially organized according to topography, soil and species-environment interactions. Farmers' knowledge allows them to adapt to heterogeneous environmental conditions, to promote synergies between species and to make trade-offs between the different contributions provided to them by agrobiodiversity.

Finally, the third section analyzes the way the farmers access to crop propagules and related knowledge. This part discusses in particular the role of exogenous plants and knowledge (from outside the study village) in agroforestry dynamics, and their implication in the resilience of small-scale agriculture. I show that to maintain and develop agrobiodiversity, farmers use their relational networks within the village and beyond. These networks allow them to observe other practices and, by mimicry, to change their own practices.

Abstract

The agroforestry dynamics described in this thesis highlight the adaptive capacities of smallholders' farmers, a *sine qua non* condition for their resilience. Farmers' local management of agrobiodiversity at the different scales reflects the holistic and integrative vision they have of their agroecosystem. Farmers' knowledge and practices have great potential for the sustainable management of agroforests and for the restoration of degraded landscapes in these tropical regions. Based on a permanent dialogue between disciplines and between scientific and farmers' knowledge, this thesis is part of a perspective of co-construction of desirable and resilient agroforestry landscapes, and calls for the recognition of local practices and knowledge.

# Remerciements

Ce travail de thèse m'a permis de réaliser à quel point il m'était souvent difficile de retranscrire et de décrire de manière linéaire des choses complexes, effervescentes et en interactions. Les belles personnes qui m'ont entourée pendant ces 3,5 ans de doctorat ont toutes été à leur manière des sources de quelque-chose ; des "quelques choses" d'une grande richesse, qui m'ont donné de la vitalité, qui ont apporté du sens à mon existence, comme l'eau à une plante, et que mes mots, inscrits noir sur blanc, sur une page A4, ne parviendront jamais à décrire avec justesse et finesse.

***

*Misaotra betsaka* Harcine. C'est en partie grâce à toi que j'ai eu envie de signer pour une nouvelle aventure dans les *tsabo* de Vavatenina. Au-delà de toute la rigueur que tu as mise dans ton travail de traductrice, tu m'as appris à vivre en brousse, tu m'as fait découvrir les richesses de ton pays, tu m'as aidé à surmonter les moments difficiles. On s'est enrichies mutuellement de notre manière de voir le monde et d'y vivre. Notre complicité et notre amitié font que nous resterons toujours des "grandes copines" aux yeux des villageois.e.s de Vohibary, que je remercie grandement : *Misaotra betsaka BE* ! en particulier les paysan.ne.s que mes enquêtes ont rendu *reraka*…et Mamani Didy qui m'a accueillie dans sa maison, qui m'a raconté les histoires du village et qui a fortement contribué à mon intégration et à la création d'une relation de confiance avec tout le monde. Votre générosité, votre curiosité et votre enthousiasme m'ont permis de vivre des moments incroyables. Parmi vous, j'ai vraiment réalisé ce qu'était la sobriété heureuse, les plaisirs simples, l'importance des relations humaines.

Vanesse et Stéphanie, je vous dis "the both" merci et *misoatra betsaka*. Votre intelligence et votre sensibilité me bouleversent et m'ont sans cesse poussée dans mes retranchements et dans mes questionnements. Vous m'avez accompagnée du début à la fin, avec beaucoup de confiance, et vous avez gardé votre patience devant mes pieds nus en brousse, devant mon anglais, et j'en passe…Merci de m'avoir soutenue dans mes divers projets "annexes", d'avoir créé le terreau fertile pour les concrétiser et d'avoir toujours su avec finesse me remettre dans le droit chemin quand je partais explorer les quatre points cardinaux de ma pensée. Je suis profondément heureuse de savoir que notre histoire ne s'arrête pas là.

Je tiens à adresser un immense merci à tous les co-auteurs et co-autrices de mes articles sans qui je n'aurai jamais accompli de tels travaux. En particulier Pascal D. et Éric P. qui m'avez transmis les premières graines de connaissances et de curiosité sur Madagascar, des graines qui n'ont fait que grandir depuis 2016. Merci Camille L. et Hasina H. pour cette aventure dans le monde de la télédétection, Vincent F. pour tes connaissances sur les sols et tes conseils méthodo ; merci Isabelle S. Nicolas V. et François M. d'avoir contribué à combler mes lacunes (abyssales) en stat, et Jacques B. de m'avoir ouvert ta fenêtre pour mieux comprendre les paysages. Merci aux chercheur.e.s malgaches, Verohanitra R. et Josao R pour vos connaissances fines du terrain.

Parce qu'en recherche, on aime bien aussi s'amuser, réfléchir et créer collectivement, au vent, sur un transat, un café ou une bière à la main, je souhaite remercier toute l'équipe RADIPAM : Christophe, Eva, Émilie, Martin, Tamara, Miguel, Vanesse, Stéphanie, Esteban, Miriana, Raphaël ainsi qu'Antoine et Lisa. Grace à vous, le jeu AgroTsabo est né, maintenant y'a plus qu'à jouer !

Un grand merci à tout le collectif de GREENnien.ne.s, et désormais de SENSien.ne.s. Si je devais "métaphorer" un peu, je pourrai dire que vous formez un arbre de connaissances, multicolore, grand et ramifié, dans lequel j'ai grimpé, sauté de branches en branches, et cueilli des fruits pour entrouvrir le feuillage de la recherche. En parlant de métaphore, merci Abi et Antonia pour vos idées

créatrices. Merci Frédérique, François et Pascale de me soutenir dans cette exploration incommensurable du sensible et des liens arts-sciences. Une exploration qui n'aurait jamais vu le jour sans la NonConference, sans la fougue, le pétillant et la créativité d'Alex, de Federico et de Myriam, et qui continue avec le collectif Art&Science.

Mes remerciements vont aussi à toutes les personnes à Madagascar qui m'ont permis de réaliser mes missions avec sérénité et qui ont été d'un grand soutien, à la fois matériel et immatériel. Je pense notamment au Dispositif de Recherches en Partenariat "Forêts et Biodiversité à Madagascar", à Hervé Saint-Macary, à Madame et Réza de L'hôtel le Choix, à ma couturière Gloria, à Ida de l'hôtel Sahavatoina, et aussi à Stéphane Corduant et l'équipe de MadaMovies.

Pendant ce doctorat, j'ai eu la chance d'être impliquée dans d'autres projets et activités de recherche qui ont enrichi ma réflexion scientifique, m'ont ouverte à d'autres champs disciplinaires et m'ont questionnée sur des enjeux plus globaux de la recherche, en particulier ceux de la recherche avec et pour les Suds. Alors je remercie les membres du projet DIFUS-E, du projet LICCI et du GDR ReSoDiv ; et aussi Théo G. et Nicolas R. qui avez fourni un super travail !

Merci aux graphistes talentueuses Charlotte M. et Sarah S. qui m'ont permis de faire de belles figures. Et merci Pierre-Olivier G., sans toi, mes rushs seraient restés dans un coin de mon disque dur…

Ma thèse n'aurait pas eu les mêmes saveurs, ni les mêmes couleurs sans la présence au quotidien des canons du bâtiment F : AJ, Dédé, Mariline et MJ. Après tout ce que nous avons vécu et construit ensembles en si peu de temps, l'amour que j'ai pour vous est désormais inébranlable. Mon quotidien de thésarde n'aurait pas été si doux, léger, chatoyant, effervescent et piquant, pour le corps et comme pour l'esprit, sans vous : Naïs, Faustine, JB, Thib, Aurélien & Thithi, mon trouple de montagnard.e.s Eva, Paulo & Olive, Martin & Joël, Cucus, Léo G & Léo S, Margaux & Sarah

Et bien sûr un grand merci à toutes les personnes ÉCEPTIONNELLES incarnées par Théthé, Clem, le J, le Z, Thus, Dav, Juju, Fanette, Paco et Mich-mich. Chaque seconde à vos côtés est un cocktail explosif de bonheurs.

Merci aux grands crus, millésimes d'excellence 2018, 2019, 2020 et 2021 de doctorant.e.s SENS pour les moments partagés ensembles.

Vous m'appelez "Ju des tropiques" ou "Ju des bois" ; je dois certainement vous fatiguer avec mes discours féministes, anticapitalistes et écologiques, mais vous avez toujours été là dans les périodes difficiles, vous m'avez toujours exprimé à quel point vous étiez fiers de ce que je faisais (même si ça reste toujours un peu obscure…) alors sachez que c'est précieux pour moi, et encore plus tout l'amour que vous me donnez. Merci la famille, Nono & petit Jean, Mamounette d'amour, Fred & Thelma, Jeannot, la famille Vanthier bien sûr, et Brigitte.

Mon envie de travailler avec et pour les paysan.ne.s des régions tropicales ne serait pas née si je ne t'avais pas rencontré, Polisson. Tu as eu et tu garderas une place particulière dans ma vie.

Déjà trop loin pour que vous puissiez lire ces mots, mais je tenais à te dire Rosou que tu es dans chacun de mes coups de crayon, et toi Papa, je t'entends dans les chants de tous les merles.

# Avant-propos

## ♦Avant-propos

Cette thèse n'aurait pas vu le jour sans le double financement de la Région Occitanie et du Cirad (ALDOCT 000588, projet APAD). Elle s'inscrit également dans le cadre de projets de recherche interdisciplinaire qui ont apporté des soutiens financiers conséquents pour la réalisation des différentes missions à Madagascar :

- Le projet SolDivA (Social Learning networks and plant DIversity management in Agroforestry landscapes, ID 1702-022) financé par l'Agence Nationale de la Recherche dans le cadre des "Investissements d'avenir" (ANR-10-LABX-001-01 Labex Agro) et coordonné par Agropolis Fondation dans le cadre d'I-SITE MUSE (ANR-16-IDEX-0006) ;

- Le projet RADIPAM (Réseaux d'Acteurs et Diversification des Paysages Agroforestiers à Madagascar) financé par la Maison des Sciences de l'Homme de Montpellier ; https://www.mshsud.org/recherche/equipes-projets-msh-sud/208-radipam

- Le projet LICCI (Local Indicators of Climate Change Impact) financé par le Conseil Européen de la recherche (ERC) dans le cadre du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne (ERC Consolidator Grant No 771056 LICCI). https://licci.eu/

Au-delà des aspects financiers, l'intégration de ce travail de recherche dans ces projets a permis d'enrichir considérablement notre réflexion et de mettre en perspective nos résultats grâce à l'organisation de rencontres et d'ateliers avec des chercheurs.e.s et des partenaires des projets.

La pandémie de la Covid-19 n'a pas empêché de mener à terme mon projet de thèse. Elle a néanmoins interrompu un travail de terrain, exploratoire, visant à découvrir d'autres dynamiques agraires dans la zone d'étude qui auraient permis de mettre en perspective mes résultats et de discuter de leur généralisation au-delà du cas étudié. Ce travail avait débuté en 2019 par un séjour dans un village plus reculé (Tanambiavy) situé au sud-ouest de la zone d'étude (Vavatenina), puis s'était poursuivi en 2020 par un second séjour, interrompu par la pandémie. Les observations réalisées lors de ces déplacements sur le terrain ont tout de même joué un rôle dans les réflexions, et contribuent aux perspectives d'approfondir et d'améliorer notre compréhension des dynamiques agricoles sur la côte est de Madagascar.



# Table des matières

♦ **Table des matières**

**Résumé** ..... **3**

**Abstract** ..... **5**

**Remerciements** ..... **7**

**Avant-propos** ..... **9**

**Table des matières** ..... **11**

**Liste des figures** ..... **15**

**Liste des tableaux** ..... **21**

**Contributions de la thèse et autres implications** ..... **23**

**Introduction générale** ..... **27**

*Chapitre 1 | Contextes et enjeux généraux* ..... *28*

1. Observer les paysages pour appréhender les enjeux de résilience de l'agriculture ..... 28
2. Diversifier l'agriculture : quelle place dans les dynamiques agraires des régions tropicales ? ..... 30
3. Mobiliser l'agrobiodiversité, de la parcelle au paysage, pour renforcer la résilience ..... 35
4. Gérer l'agrobiodiversité grâce aux connaissances paysannes sur les interactions plantes-milieu ..... 42
5. Accéder aux plantes et aux connaissances pour maintenir et faire évoluer l'agrobiodiversité ..... 46

*Chapitre 2 | Cadre de recherche* ..... *50*

1. Problématique générale et approche globale ..... 50
2. Présentation du cas d'étude : un village de la côte nord-est de Madagascar ..... 52
3. Présentation des parties : chapitres et cadres conceptuel et méthodologique ..... 63

**Les dynamiques agroforestières dans les paysages** ..... **73**

*Chapitre 3 | From shifting rice cultivation (tavy) to agroforestry systems: a century of changing land use on the East coast of Madagascar* ..... *74*

1. Introduction ..... 74
2. Material and methods ..... 76
3. Results ..... 78
4. Discussion ..... 83
5. Conclusion ..... 92
6. Résumé et transition ..... 93

*Chapitre 4 | Agroforestry for land restoration : implications for a degraded landscape on the East coast of Madagascar* ..... *95*

1. Introduction ..... 95
2. Material and methods ..... 97
3. Results ..... 106
4. Discussion ..... 111
5. Conclusion ..... 116
6. Résumé et transition ..... 117

**Les connaissances et les pratiques paysannes relatives à la gestion de l'agrobiodiversité dans les *tsabo*** ..... **119**

*Chapitre 5 | Exploring farmers' agrobiodiversity management practices and knowledge in clove agroforests of Madagascar* ..... *120*

1. Introduction ..... 120
2. Material and methods ..... 123
3. Results ..... 128
4. Discussion ..... 133
5. Conclusion ..... 138
6. Résumé et transition ..... 139

*Chapitre 6 | Local knowledge of the interactions between agrobiodiversity and soil: a fertile substrate for adapting to soil changes in Madagascar?* ..... *141*

1. Introduction ..... 141
2. Material and methods ..... 143
3. Results ..... 146
4. Discussion ..... 153
5. Conclusion ..... 156
6. Résumé et transition ..... 158

**La circulation des plantes et des connaissances paysannes** ..... **161**

*Chapitre 7 | Translocality in the circulation of plants and knowledge: perspectives for agricultural systems resilience* *162*

1. Introduction ..... 162
2. Material and methods ..... 165
3. Results ..... 170
4. Discussion ..... 181
5. Conclusion ..... 186
6. Résumé et transition ..... 187

**Discussion générale et perspectives** ..... **189**

*Chapitre 8 | Discussion générale* ..... *190*

1. Dynamiques de l'agrobiodiversité et des paysages ..... 190
2. Pratiques de gestion de l'agrobiodiversité et résilience ..... 197

3. Circulation et évolution des connaissances ..... 205

*Chapitre 9 | Perspectives pour une restauration intégrée des paysages via l'agroforesterie* ..... *210*

***Efa vita*** ..... **219**

**Littérature** ..... **221**

**Annexes** ..... **253**



# Liste des figures

## ♦Liste des figures

Introduction générale

Figure 1-1: Cortège des types de cultures dans chaque classe de taille d'exploitation, définie par rapport à la surface cultivée, de 55 pays. Figure extraite de Ricciardi et *al.* (2018) ..... 31

Figure 1-2: Exemples de paysages agroforestiers de zones tropicales humides : (A) un paysage agricole en zone forestière du Sud Cameroun (région du Littoral, Sanaga Maritime) dans lequel les différents modes d'exploitation et d'organisation sociale du travail (agro-industrie, élites et exploitations familiales) associés à la culture du palmier à huile construisent un paysage hétérogène (Martin 2016), (B) un front pionnier d'expansion du cacaoyer en Côte d'Ivoire (©M.Notaro) et (C) un paysage agricole dans une région de production de théiers au nord du Laos (©J.Mariel). ..... 32

Figure 1-3: Diversité d'espèces comestibles cultivées par des paysan.ne.s Betsimisaraka et vendues sur les marchés locaux, côte Nord-Est de Madagascar (©J.Mariel) : (A) jeunes pousses de *Dracaena reflexa*, (B) patates douces *Ipomoea batatas*, (C) variété d'aubergine *Solanum melongena*, (D) en haut à gauche du concombre *Cucumis sativus*, en haut à droite des feuilles de *Silanthes oleracea*, en bas à gauche des bottes de *Brassica rapa* (*pekinensis*), en bas à droite des fruits de *Solanum macrocarpum*, (E) papaye *Carica papaya*, (F) épis d'une variété de maïs *Zea mays*, (G) feuilles de taro *Colocasia esculenta*, (H) feuilles de manioc *Manihot sp.*, (I) en bas à gauche des courgettes *Cucurbita pepo*, en bas au milieu des fruits de *Luffa acutangula*, en bas à droite des concombres, (J) chayote, *Sechium edule*..... 39

Figure 1-4: Les différentes dimensions des connaissances locales. La dimension empirique se rapporte à un ensemble d'observations sur l'environnement et de pratiques de gestion gouvernant l'usage des ressources naturelles (Reyes-García et al. 2007). La dimension théorique, qui relève davantage de traits cognitifs, se décline en deux systèmes : celui des classifications des objets et des évènements (Berlin and Stevens 1994) et celui des croyances et des valeurs relatives à l'environnement (Berkes and Henley 1997). ..... 42

Figure 1-5: Divers usages de l'agrobiodiversité des agroforêts de la côte nord-est de Madagascar (©J.Mariel). (A) Tronc d'arbre mort creusé pour y loger un essaim d'abeilles et construire une ruche. (B) Produit de la presse des fruits du palmier à huile, *Elaeis guineensis*, porté à ébullition pour faire évaporer l'eau et séparer la matière solide de l'huile. (C) Empaquetage de portions individuelles de riz avec des feuilles d'*Aframomum angustifolium* lors d'une cérémonie de retournement des morts (Tsabohara). (D) Séparation des différentes composantes des feuilles de palmier *Rafia farininfera* pour la fabrication de ficelle. (E) Séchage des tiges de *Lepironia mucronata* utilisées pour la vannerie. (F) Chaire de noix de coco râpée (*Cocos nucifera*) utilisée pour la préparation de l'huile servant aux femmes de soin nutritif pour leurs cheveux. Fabrication en bambou (*Bambusa sp.*) de (G) verres et de louches, de (H) barrière et de (I) paniers (*sobika*). ..... 44

Figure 1-6: Technique de bouturage du litchi (*moso*) (©J.Mariel). (A) Préparation de la branche de litchi (*Litchi chinensis*) à bouturer : enrobage du rameau avec de la matière humique récoltée dans le puits formé par une fougère épiphyte (photo B, nom botanique non connu). (C) *Moso* prêt à être planté car de nombreuses radicelles se sont développées dans l'enrobage de matière humique..... 47

Figure 2-1: (A) Localisation de Madagascar dans la zone intertropicale. (B) Régions bioclimatiques présentes à Madagascar. Ces régions reposent sur des critères biogéographiques. ..... 53

Liste des figures

Figure 2-2: (A) Parc à bœufs converti en champs de *voantsiroko* (*Senna occidentalis*), cliché pris par M. Petit, légende et photographie extraites de Dandoy (1973). (B) Petit jardin d'espèces vivrières, avec au premier plan des brèdes *Solanum nigrum* et au deuxième plan des plants de tabac *Nicotiana tabacum* (©J. Mariel). (C) Case en construction, légende et photographie extraites de Dandoy (1973). (D) et (E) des habitations traditionnelles Betsimisaraka dont le toit est fabriqué en feuilles de palmier *Ravenala madagascarensis*, les murs en bambou et la charpente en bois de différentes essences (e.g *Eucalyptus sp.*, Grevillea sp.) (©J. Mariel). ..... 56

Figure 2-3: L'intégration du giroflier et du caféier dans les parcelles et dans les paysages agricoles de la côte nord-est. (A) Photographie et dessins extraits de Dandoy (1973). (B) Dessins extraits de Blanc-Pamard and Ruf (1992)..... 57

Figure 2-4: (A)(B) Fagots de bois morts et de feuilles sèches de palmiers prêts à être amenés à l'alambic. (C) Séchage sous abris des feuilles de giroflier dans des moustiquaires converties. (D) Emplacement d'un alambic, avec son abri, du bois de chauffe et des sacs remplis de feuilles sèches de giroflier. (E) Acheminement de l'eau depuis la source vers l'alambic grâce à des "canalisations" en bambou. (F) Séparation de l'huile essentielle et de l'eau en sortie de l'alambic. (G) Alambic et son foyer. (H) Rassemblement de villageois et de villageoises autour de l'alambic (toutes les photographies ©J. Mariel)..... 59

Figure 2-5: (A) Vue aérienne des deux hameaux de Vohibary et des *lasy* enquêtés. (B) Photographie du village dans son paysage de tanety. A : image satellite Pléiade acquise en 2018 (cf. chapitre 4). B : ©J.Mariel. ..... 62

Figure 2-6: Schéma conceptuel général de mon travail de recherche (graphismes ©C.Mariel). ..... 64

Figure 2-7 : Illustration schématique de l'hétérogénéité de composition et de configuration, en considérant comme unité de base la forme carrée d'un pixel (figure inspirée de Fahrig et al. 2011). . 66

Figure 2-8: (A) Méthode de pile-sorting pour explorer en focus groupe les différents types de sol et l'adaptation des espèces (représentées sur les cartes) à ces différents types de sol. (B) Focus groupe pour recueillir le niveau de consensus des paysan.ne.s concernant les changements observés dans leur environnement (protocole LICCI, Reyes-García et al. 2021). (C) Méthode de carte participative pour étudier la composition et l'organisation spatiale des espèces dans une agroforêt selon la topographie. ..... 68

Figure 2-9: Exemples de différentes structures de réseaux relationnels de paysan.ne.s à l'échelle de leur communauté, avec les nœuds ronds correspondant à des paysan.ne.s et les nœuds carrés à des organisations extérieures à la communauté (figure reprise de Labeyrie et al. 2021a). (A) **Réseau centralisé** : peu de paysan.ne.s (nœuds oranges) ont un nombre élevé de connexions avec d'autres paysan.ne.s de leur communauté et la majorité estpeu connectes (nœuds bleus). (B) **Réseau modulaire** : des sous-réseaux (orange, bleu, vert) sont formés par des paysan.ne.s très connectés entre eux en lien avec le partage d'un attribut (par exemple le lieu de résidence, l'appartenance ethnique). (C) **Réseau centralisé connecté avec des organisations** (par exemple institutionnelle, associative) : le réseau global est très centralisé car peu d'organisations sont connectées avec des paysan.ne.s et inversement. (D) **Réseau polycentrique connecté avec des organisations** : plusieurs organisations sont connectées avec des paysan.ne.s de sous-réseaux différents qui jouent le rôle de "passeur" entre les organisations et la communauté..... 70

Partie I

Liste des figures

Figure 3-1: The study area: the village of Vohibary, district of Vavatenina, Region of Analanjirofo, Madagascar ..... 75

Figure 3-2: Land use map of the agricultural landscape of Vohibary: (A) in 1966 after Dandoy (1973); (B) in 2016 (map based on aerial photographs combined with field surveys) (map digitized and georeferenced by H. Herimandimby and J. Mariel, July 2016) ..... 80

Figure 3-3: (A) Sowing rain-fed rice in a *tavy* in the 1960s (Kiéner 1963). (B) *Tavy* ready for harvest at Vohibary in 1966 (Dandoy 1973). (C) Coffee plantation under *Albizzia lebbeck* on the Malagasy east coast in the 1930s (photo Ledreux © CIRAD). (D) Installation of a rice field in the 1960s in Vohibary (Dandoy 1973). ..... 81

Figure 3-4: Several types of agroforestry systems with *tavy* field plots covering tanety landscape (Photo Mariel.). ..... 82

Figure 3-5: (A) Agroforestry system with timber species (Vohibary, 2019) (©J.Mariel). (B) Packaging of lychees before delivery to the middleman, Vohibary, November 2019 (©J.Mariel)..... 83

Figure 4-1: Geographic location of the study area in Madagascar. ..... 98

Figure 4-2: (A) Map of the Vavatenina area in 1966 (figure taken from Dandoy 1973). The landscape was mainly occupied by *tavy*, fallows and some forested areas. (B) Typical landscape of the study area that can be seen in 2019 (©J.Mariel). The landscape is shaped by an uneven topography, made up of successions of small hills and narrow valleys wrapped over a North-East/South-East topographic gradient rising from about 90 to 690 meters. The landscape is a mosaic of different land-uses: a) plantation of silky oalks (*Grevillea banskii*), b) diversified agroforest, c) association of clove trees and silky oalks, d) clove monoculture, e) plantation of cassava, f) paddy rice in low-land fields, g) short herbaceous vegetation with ferns, h) herbaceous vegetation with bamboos, traveler palms (*Ravenala madascarensis*) and giant bramble (*Rubus alceifolius*)..... 99

Figure 4-3: Topographic maps of the study area derived from SRTM data: (A) altitude, (B) slopes and (C) slope exposures..... 101

Figure 4-4 : (A) Thematic land-use maps derived from Pleiades satellite data, and produced by multispectral image classification. (B) Landscape matrix map, produced by majority analysis of the land-use map. The number associated to each matrix zone corresponds to the land-use class number. Each matrix zone was named as following: 1= agroforest matrix, 2 = timber matrix, 6 = poor-woody-fallow matrix, 7 = rich-woody-fallow matrix, 8 = bramble-fallow matrix, 9 = rich-shrubby-fallow matrix and 10 = herbaceous matrix. (C) Proportion of the different land-use classes over the study area (All) and each matrix zone..... 107

Figure 4-5: Land-use distribution in the study area depending on (A) the exposure, (B) the slope and (C) the altitude. The black line corresponds to the proportion of the total surface in the given interval. ..... 109

Figure 4-6 : (A) Mapping of diversified agroforests patches according to their class of size surface throughout the study area. (B) Proportion of interfaces between the land-uses and diversified agroforestry patches according to their class of size. DA: Diversified Agroforests. Tsp.P: Timber species Plantations. C.M: Clove monocrops. P: the two types Parks (diversified and low-diversified). W.F: the two types of Woody Fallows (diversified and low-diversified). S.F: the two types of Shrubby Fallow (Bramble and diversified). Ac.P.Sv: Annual crops, Pasture, Short vegetation. P.F.F: Paddy Rice Field. ..... 111

Partie II

Figure 5-1: Farmers-agrobiodiversity interactions in agroforests at the interface of socio-ecological dynamics. Social, economic and biophysical drivers play at different scales: farm, local, national, and global scales. ..... 122

Figure 5-2: Location of the study site in Madagascar and landscape mosaic at the village scale. ..... 124

Figure 5-3: Methodology of data collection and analysis for to the study of the two level of agrobiodiversity spatial organization within clove-base *tsabo*: the overall patterns of organisation (distribution and location according to the slope) and the associations of species in micro-zone. (A) is an example of participatory map obtained (*ambony* is the upper part of the *tsabo*, *ambany* is the lower part, and *vavazaha* corresponds to a stream or a runoff ravine). (B) illustrates how the map with plant species indicated and the tracing paper were coded. ..... 127

Figure 5-4: Heatmaps based on the relative occurrence of the 14 most frequent species in *tsabo* (frequency > 7) according to the two variables selected for coding the spatial organization of species from the participatory maps, namely: (A) the way in which each species was spatially distributed compared to the other species and over the total area of the *tsabo* and (B) the position of the species according to the topographical gradient of the *tsabo*. ..... 129

Figure 5-5: Typology of micro-zones and its characteristics related to the agrobiodiversity present in micro-zones. The presence or absence of clove trees that are over 10 years old (producing cloves) discriminates two groups of micro-zones: group A and group B. Calculation of the Jaccard index for each pair of micro-zones and the representation in dendograms, based on the agglomerative complete linkage principle, differentiate four types of micro-zones: A1, A2, B1 and B2. ..... 130

Figure 5-6: Density (individuals per ha) of clove tree (productive and young tree), vanilla and four fruit tree species that frequently occur in *tsabo* (avocado, breadfruit, jackfruit, and lychee). The density was calculated from the number of individuals per species reported by the farmers and the area of *tsabo* measured by GPS. The y-axis is log-transformed ..... 131

Figure 5-7: Map of ecological interactions from farmers' knowledge (17 farmers) concerning interactions with plant species of clove-based *tsabo* that have positive and negative effects on clove trees. ..... 133

Figure 6-1: Presentation of the study area and the different methods applied in the villages surveyd. Note: AGB: AGroBiodiversity. LICCI: Local Indicators of Climate Change Impacts programm research. ..... 144

Figure 6-2: Local classification of tanety soils described by farmers from Vohibary in focus group (N=17). The table details the types of criteria used to differentiate the two soil classes. ..... 147

Figure 6-3: Presentation of tanety soil changes, their causes and consequences that were described by people of the Vavatenina zone (from Ambalaronga, Nosibe and Ambodivoangy villages) and confirmed during focus groups conducted in the three villages. Note: the protocol applied were developed by the LICCI research program https://licci.eu/research-tools/. ..... 148

Figure 6-4 : Photographs taken by J.Mariel during several visits to *tsabo* owned by farmers from Vohibary. These photographs illustrate different soil fertilization techniques through the addition of organic matter. (A) Collecting leaves, grasses and young branches of *Litsea glutinosa* at the feet of banana and clove trees. (B) Collecting peelings and rotten fruits at the feet of vanilla. (C) Composting

the banana stems with household and vegetable waste, zebu and pig manure and chicken droppings. (D) Cutting a dead banana stem into small pieces and piling them up at the feet of vanilla. ..... 150

Figure 6-5 : Result of the exercise carried out in focus group with farmers from Vohibary (N=17), for which they were asked to distribute 38 plant species (cards) in a *tsabo* drawn on the ground, according to species adaptation to the different soil defined by the farmers' classification and related to the topography. ..... 151

Figure 6-6: Proportion of responses given by farmers from Vohibary (N=84) for each species (N=38) and according to the knowledge of soil-agrobiodiversity interactions: (A) the edaphic requirement of species, i.e. dire the species *mifidy tany* ("chooses its soil") or *tsy mifidy tany* ("does not choose"), (B) the effect of species on soil fertility, i.e. the species *mandalonaka tany* ("makes the soil fertile") or *mampatoy tany* ("makes the soil infertile") or *tsy miova* ("does not change the soil"). Note: 1= proportion of responses above 75 %, 2= proportion of responses between 60 % and 75 %, 3= proportion of responses between 40 % and 60 %, and relatively high proportion of non-responses, 4= proportion of responses between 30 % and 45 %. ..... 152

Partie III

Figure 7-1 : Conceptual network of translocal circulation of propagules and knowledge. ..... 167

Figure 7-2: The different types of propagules that circulate in the network: (A) an offshoot of banana carried in a basket, (B) vanilla cuttings hanging on a bamboo stick, (C) seeds of clove tree, (D) and (E) seedlings of clove tree in a farmer's nursery set up in his *tsabo*. ..... 171

Figure 7-3: (A) Geographical location of the study site and the different translocal scales involving circulation ties of plant or knowledge. (B) Total number of ties according to the local or the different translocal scales. (C) Number of translocal and local ties according to the type of resources (knowledge, plant) and the species (banana, clove, vanilla). N : Number of circulation ties..... 173

Figure 7-4: Number of propagule and knowledge acquisitions according to the translocality, the species (banana, clove, vanilla) and the nature of the relationship between the farmer and the source according to the presence of fihavanana. Shannon: commonly between 0 and 5, the higher the index, the greater the diversity. Simpson: the closer the index is to 1, the more homogeneous the set of sources in the network is. ..... 174

Figure 7-5: Number of propagule and knowledge acquisitions according to the translocality of the acquisition, the gender of farmers and the kinship between the farmers and the sources, in the case of the three species are aggregated species (A) or considered separately (B). M = Men, W = Women. ..... 175

Figure 7-6: Visualization of the translocal network of banana, clove and vanilla related knowledge. ..... 179

Figure 7-7: Visualization of the translocal network of banana, clove and vanilla propagules. ..... 180

Discussion générale et perspectives

Figure 8-1: Deux images aériennes, l'une acquise en 2013 et l'autre en 2018, de quatre *tsabo* (chapitre 5). L'évolution de l'occupation du sol des *tsabo* traduit la croissance de la végétation entre 2013 et 2018 et montre aussi la plantation d'espèces sur des sols qui étaient nus en 2013 (par exemple dans les cas des *tsabo* B, C et D). ..... 191

Figure 8-2: (1) Carte d'occupation du sol de la zone de Vavatnina présentée dans le chapitre 4. (2) Zoom sur les quatre fenêtres A, B, C et D pour mieux observer l'hétérogenité de composition et de configuration dans les paysages de Vavatnina. ..... 193

Figure 8-3: Les photos A et B présentent deux variétés d'igname (*Dioscorea sp.*) : A est un igname *fotsy* (chair blanche) et B est *mena* (chair violette). La photo C montre des avocats de différentes couleurs. Les photos D et E correspondent à deux variétés de banane *Musa sp* : D est la variété *voantsiroko*, F est la variété *lahy* (*Musa paradisiaca*) (©J.Mariel). ..... 194

Figure 8-4: Une liane de vanille tutorée sur un tronc de *Ficus sp.* (A) (car "ses fruits apportent de la fertilite" J.) ou de *Jatropha curcas* (B). (C) Substance produite par le *Jatropha curcas* et qui selon les paysan.ne.s enquêté.e.s explique l'effet positif de cette espèce sur la vanille (car "l'écorce apporte de l'eau aux racines [adventives] de la vanille quand elles s'accrochent au tronc" R.) (©J.Mariel). ..... 198

Figure 8-5: Exemples de parcs associant principalement des girofliers avec du riz (A) et une variété de pois (B). C) Parc associant du manioc, des ananas avec quelques caféiers et girofliers. D) Versant de tanety comportant en bas à droite une parcelle dont le défrichage suivi du brûlis a épargné plusieurs litchis, des arbres à pain et des eucalyptus (©J.Mariel). ..... 199

Figure 8-6: Répartition schématique de l'agrobiodiversité le long d'une toposéquence des paysages de la zone de Vavatenina (graphismes ©C.Mariel). ..... 201

Figure 8-7 : Exemples de différentes espèces animales et végétales, et d'un champignon ("robe de mariée") rencontrées dans la zone de Vavatenina (©J.Mariel). ..... 203

Figure 9-1: (A) Tas de feuilles de giroflier distillées en train de se décomposer devant l'alambic. (B) Jardin de brèdes dans lequel les paysan.ne.s ont utilisé les feuilles de giroflier compostées pour amender le sol. (C) Technique de mise en suspension d'une adventice (*Imperata cylindrica*) pour éviter qu'elle repousse après avoir été arrachée. (D) Trou creusé autour d'un jeune plant de giroflier en vue de le remplir de matière organique (*zezika* par exemple) pour "booster" la croissance de l'arbre. (E) Recouvrement du sol avec des végétaux secs (©J.Mariel). ..... 211

Figure 9-2: Carte du territoire de Vohibary dessinée par plusieurs paysans lors d'un focus groupe. 214

Figure 9-3: Photographies prises par E. Stephan et R. Figueroa Brollo lors de la 1ière session de test du prototype de jeu AgroTsabo avec les étudiants de l'IDES (Appendix 11). (A) Plateau du jeu dans son intégralité. (B) Portion individuelle du plateau de jeu, correspondant à un *tsabo*, et sur laquelle les joueurs d'une même équipe réalisent des actions dans leur *tsabo*. (B) Les différents éléments du jeu. (D) Des joueurs en train de manipuler leur *tsabo*. ..... 217

# Liste des tableaux

♦**Liste des tableaux**

Partie I

Table 3-1: Some characteristics of the village of Vohibary in 1966 (after Dandoy 1973) and in the 2016 surveys ..... 77

Table 3-2: Comparison of land use in the Vohibary region, in 1966 (from Dandoy 1973) and in 2016: changes in the cultivated surface area in each cropping system ..... 79

Table 4-1 : Description of the thirteen land-use classes. In this description, we use the term fallow not only to refer to the vegetation of land in a shifting cultivation cycle, but also to that of land that has been temporarily abandoned ..... 102

Table 4-2 : Confusion matrix for the land-use automatic classification. Class numbers correspond to the classes defined at Table 4-1 ..... 104

Table 4-3: Heterogeneity metrics inside the different landscape matrix zones and the overall study area. SHDI corresponds to the diversity Shannon index. HET represents the global heterogeneity, HET-agg the heterogeneity only due to land-uses of same type, and HET-frag the heterogeneity only due to land-uses of different types. ..... 110

Partie II

Table 6-1 : Changes in cultivation practices initiated by farmers from Vohibary in response to soil changes, based on the type of change (adoption, adaptation, abandonment) and the type of practice. ..... 149

Partir III

Table 7-1 : Distribution of the sample of farmers (N= 98) in relation to the seven variables tested in GLMs. [1]*lasy* is house that is not located in the heart of the village but in the surrounding area. [2]At the time the survey. ..... 177

Table 7-2 : The results of the GLMs presented correspond to the best model obtained by backward procedure for the 2 networks (Knowledge and Plant). Significativity are concluded at a threshold of 0,05. *: p-value < 0.001 '***', < 0.01 '**', < 0.05 '*' and < 0.1 '.' ..... 178



# Contributions de la thèse et autres implications

### ♦Publications

**Juliette Mariel**, Éric Penot et Pascal Danthu. 2021. Les systèmes agroforestiers dans les stratégies paysannes de résilience à Madagascar. *Économie rurale. Agricultures, alimentations, territoires*, nº 377 : 43-63. https://doi.org/10.4000/economierurale.9104.

**Juliette Mariel**, Stéphanie M. Carrière, Éric Penot, Pascal Danthu, Verohanitra Rafidison et Vanesse Labeyrie. 2021. Exploring Farmers' Agrobiodiversity Management Practices and Knowledge in Clove Agroforests of Madagascar. *People and Nature* 3 (4): 914-28. https://doi.org/10.1002/pan3.10238.

**Juliette Mariel**, Éric Penot, Vanesse Labeyrie, Hasina Herimambidy et Pascal Danthu. Accepté. From shifting rice cultivation (*tavy*) to agroforestry systems: a century of changing land use on the East Coast of Madagascar. *Agroforestry Systems.*

**Juliette Mariel**, Vincent Freycon, Josoa Randriamalala, Verohanitra Rafidison et Vanesse Labeyrie. Accepté. Local knowledge of the interactions between agrobiodiversity and soil: a fertile substrate for adapting to soil changes in Madagascar? *Journal of Ethnobiology.*

Labeyrie Vanesse, Martine Antona, Jacques Baudry, Didier Bazile, Örjan Bodin, Sophie Caillon, Christian Leclerc, Christophe Le Page, Sélim Louafi, **Juliette Mariel**, François Massol et Mathieu Thomas. 2021. Networking Agrobiodiversity Management to Foster Biodiversity-Based Agriculture. A Review. *Agronomy for Sustainable Development* 41(1): 4. https://doi.org/10.1007/s13593-020-00662-z.

Carrière Stéphanie M., Herizo Randriambanona, Vanesse Labeyrie, Dominique Hervé, **Juliette Mariel**, Samuel Razanaka, et Josoa R Randriamalala. 2022, sous presse. Biocultural landscapes diversity shaped by agricultural systems in Madagascar. In *The New Natural History of Madagascar*, 2022. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03235166.

Danthu Pascal, Isabelle Michel, Stéphanie M. Carrière, Vanesse Labeyrie, Bakolimalala Rakouth, Julien Sarron, **Juliette Mariel**, Dominique Lasserre et Eric Penot. 2022. Coming from Elsewhere: The Preponderance of Introduced Plant Species in Agroforestry Systems on the East Coast of Madagascar. *Agroforestry Systems.* https://doi.org/10.1007/s10457-022-00732-z.

### ♦Présentations orales et posters

Présentations orales

"A holistic approach to analyze agroforestry heterogeneity at the cropping system and landscape scales in an agrarian locality in Madagascar". J. Mariel, É. Penot (orateur), H. Herimandimby, F. Fawbush, V. Labeyrie, P. Danthu. 4th World Congress on Agrofrestry, 20-22 mai 2019, Montpellier. (Appendix 12)

"La restauration des terres par l'agroforesterie : implications pour un ancien paysage forestier sur la côte est de Madagascar". J. Mariel (oratrice), H. Herimandimby (orateur), V. Labeyrie, S. M. Carrière, J. Baudry (orateur) et C. Lelong (oratrice). Séminaire Alakamisy LMI, 10 mars 2022, Montpellier.

"Serious games as a way to foster social learning of local actors and researchers towards sustainable agroforestry management". J. Mariel, M. Andriambololonirina, S. M. Carrière, E. Coudel, V. Labeyrie, M. Notaro (orateur), E. Perrier, T. Pascutto, G. Resque, M. Rotenberg, E. Stephan, C. Le Page. 5th World Congress on Agrofrestry, 17-20 juillet 2022, Québec. (Appendix 13)

Posters

"A method to study complex agroforestry landscapes: illustration in Madagascar". H. Herimandimby (orateur), J. Mariel, V. Labeyrie et C. Lelong. LANDSCAPE 2021, 20-22 septembre 2021, en visio. (Appendix 14)

"Comprendre la construction d'un paysage agraire hétérogène à Madagascar : une approche par l'étude des pratiques et connaissances paysannes". J. Mariel (oratrice), S. M. Carrière, V. Rafidison et V. Labeyrie. Rencontres d'Écologie des Paysages, 11-13 octobre 202, Rennes. (Appendix 15)

### ♦Implications dans des activités scientifiques

Participation à l'animation scientifique du thème "Dynamiques des pratiques, des appartenances et des paysages" au sein de l'UMR SENS.

Implication dans la réalisation d'activités du projet de recherche transversale DIFUS-E (compréhension de la DIversité des points de vue dans la recherche pour le développement comme levier d'action pour le changement Face aux Urgences Socio-Ecologiques) impliquant des chercheur.e.s des UMR SENS et ASTRE. https://www.mshsud.org/recherche/equipes-projets-msh-sud/239-difuse.

Participation aux journées et aux séminaires organisés par le Groupement de Recherche ReSoDiv (Réseaux Sociaux et Diversité biologique). https://resodiv.cnrs.fr/amp/le-gdr/.

### ♦Activités d'encadrement et d'enseignement

Encadrement

Co-encadrement du stage de fin d'études (M2, Master GEEFT, AgroParisTech Montpellier) de Nicolas Roura en 2019 (6 mois) ayant donné lieu à la rédaction d'un mémoire de fin d'études : "Étude de la diversité et déterminants des structures et cortèges d'espèces présents sur les parcelles agroforestières de girofliers du village de Vohibary au nord-est de Madagascar".

Co-encadrement d'un stage de césure (M1, Master BEE Darwin, Université de Montpellier) de Théo Guillerminet en 2020-2021 (3 mois) ayant donné lieu à une présentation orale devant les membres du GDR ReSoDiv : "Une application de la théorie du consensus culturel en ethnoécologie – Illustration avec les connaissances paysannes sur les interactions sol-plantes chez les Betsimisaraka".

Co-encadrement du stage de césure d'Esteban Stephan en 2021 (3 mois) ayant donné lieu à la construction d'un prototype de jeu de rôle testé avec l'équipe du projet RADIPAM en août 2021.

Co-encadrement d'Esteban Stephan et de Rafaël Figueroa Brollo dans le cadre d'un module tutoré (M2, Master Études du Développement, Institut d'Étude du Développement Économique et Social, Université Paris 1 Panthéon Sorbonne), entre septembre 2021 et janvier 2022, ayant donné lieu à la finalisation du jeu de rôle (plateau et règles de jeu), à la présentation du jeu devant le master "Construire ensemble une résilience agroforestière – Jeu coopératif d'échange de savoir-faire et d'exploration de stratégies agricoles" et au test du jeu avec les étudiants du master en février 2022.

Enseignement

Intervention dans le cadre du module PLURI des M2 de la formation Production Végétale Durable (PVD) de l'Institut Agro (3h).

Intervention dans le cadre du module Ethnoécologie et Développement Durable des M2 de la formation Gestion Environnementale des Écosystèmes et Forêts Tropicales (GEEFT) de l'AgroParisTech (3h).

Interventions dans le cadre du module Ethnobotanique et Interactions Bioculturelles des M1 de la formation Biodiversité et Gestion des Écosystèmes Tropicaux (BioGET) de l'Université de Montpellier (11h).

### ♦Activités de recherche exploratoire sur les liens entre arts et sciences

Co-organisation et animation avec l'association Non-Conference du colloque "Art for Science – Unlocking Art power for Science and Research", à la Maison des Sciences de l'Homme Sud, les 27-28 septembre 2019 à Montpellier. https://artforscience.sciencesconf.org/





Co-organisation avec l'association Non-Conference, la gallerie du Lieu Multiple et des chercheur.e.s de l'UMR SENS, et animation du 1ier évènement "Ode Au Chaos" dans le cadre du cycle de rencontres *Arts & Sciences face aux enjeux socio-écologiques*, au Théâtre de l'Agora, le 28 septembre 2021 au Crès. https://nonconference.wordpress.com/events/ .

Présentation orale "Porosités Arts-Science" dans le cadre des Jeudis MO.CO. Panacée, le 10 mars 2022 à Montpellier. https://www.youtube.com/watch?v=bPe9OM0QQNc .

Co-organisation avec l'association Non-Conference, la gallerie du Lieu Multiple et des chercheur.e.s de l'UMR SENS, et animation du 2ième évènement "Penser, Sentir (comme) un Arbre" dans le cadre du cycle de rencontres *Arts & Sciences face aux enjeux socio-écologiques*, à la Maison Pour Tous Frédérique Chopin, le 11 mars 2021 à Montpellier. https://nonconference.wordpress.com/events/ .

### ♦Vulgarisation scientifique

"Réseaux relationnels, pratiques et connaissances : comment l'étude de ces trois éléments permet-elle de mieux comprendre l'émergence et le développement de l'agroforesterie dans un territoire de la côte est de Madagascar", intervention lors d'un PhD Pub "Ma thèse en 10 mn" organisé à la Barbote à Montpellier en février 2020.

Participation au concours Ma thèse en 180 secondes (Edition 2021) organisé par le Collège Doctoral Languedoc Roussillon. https://www.youtube.com/watch?v=vbtWCuH_VV4 .

Co-construction avec d'autres doctorant.e.s, Justin Jaricot (acteur et metteur en scène) et Didier Nectoux (directeur du Musée de Minéralogie MINES ParisTech) d'une pièce de théâtre contemporain de vulgarisation scientifique présentée lors du Colloque Science & You, les 14- 19 novembre 2021.

"Paysages betsimisaraka", court métrage réalisé avec l'aide de Pierre-Olivier Gaumin (concepteur multimédia, Maison des Sciences de l'Homme Sud, Montpellier). Sortie prévue le 20 mai 2022.

# Introduction générale



# Chapitre 1 | CONTEXTES ET ENJEUX GENERAUX

## 1. OBSERVER LES PAYSAGES POUR APPREHENDER LES ENJEUX DE RESILIENCE DE L'AGRICULTURE

Un paysage[1] agricole, aussi appelé paysage cultivé ou productif (Fischer et al. 2006), est un paysage modifié par des pratiques d'usage des terres en vue de la production de végétaux ou de l'élevage d'animaux pour répondre à des besoins humains, alimentaires ou non. Ces terres cultivées coexistent avec des espaces "naturels" ou "semi-naturels", c'est-à-dire qui présentent peu de traces de modifications humaines récentes ou qui sont moins impactés par ces dernières que les espaces agricoles (forêt, rivière et ripisylve, savane, prairie naturelle par exemple). Le paysage sera ici considéré comme une échelle spatiale d'observation des interactions entre une société humaine (système social) et son milieu biophysique (système écologique) ; il reflète ainsi l'empreinte visible d'un système socio-écologique (Martín-López et al. 2017). Les paysages agricoles témoignent dans ce travail des interactions d'une société vivant de l'agriculture[2] et d'autres activités. Ils forment ainsi des mosaïques d'autant plus complexes et hétérogènes qu'il y a de pratiques humaines (agricoles et non agricoles) et d'espaces non humanisés ; dans le monde, il y a autant de paysages agricoles qu'il y a de sociétés rurales et de milieux (biophysique, climatique), mais aussi d'échelles spatiales et de temps dans lesquelles s'inscrit notre regard. Les paysages agricoles sont donc multiples et dynamiques.

Dans de nombreuses régions du monde, la mosaïque des paysages agricoles évolue aujourd'hui vers un tableau monochrome, c'est-à-dire une agriculture sur de grandes surfaces et peu diversifiée (Landis 2017). Ce tableau est l'œuvre d'une agriculture en expansion et de pratiques agricoles reposant sur des logiques d'intensification et de spécialisation vers un nombre réduit d'espèces cultivées (Khoury et al. 2014, Perfecto et al. 2019, Raimond et al. 2020a). Les facteurs de ces dynamiques agraires sont entre autres liés à l'augmentation des besoin en terres agricoles causée par celle des besoins alimentaires et non alimentaires (par exemple les biocarburants) d'une population mondiale croissante, de la globalisation des échanges et de leur contrôle par les marchés financiers (mise en concurrence des matières premières agricoles) et de la réduction progressive des terres émergées propices à l'agriculture, résultant notamment de l'urbanisation et de la dégradation des sols (U.N.C.C.D 2019). Alors que 40 % de ces terres sont déjà occupées par l'agriculture (Foley et al. 2011), la pression exercée sur elles ne va pas baisser à l'avenir étant donné les estimations démographiques annoncées (plus de 9 milliards d'habitants sur la planète d'ici à 2050) et les divers impacts prévus du changement climatique

[1] D'après la définition du CNRTL (Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales), le mot "paysage" est dérivé de "pays" et correspond à "l'*étendue de pays que l'œil peut embrasser dans son ensemble*" (Garnier, Hippolyte, 1224 ds Hug.). Cette définition rend compte d'une part de la dimension spatiale du paysage et d'autre part du caractère subjectif de sa délimitation et de sa vision.

[2] Dans la suite du manuscrit, notre emploi du terme agriculture ne fera pas uniquement référence à la culture de végétaux mais aussi à l'élevage.

tels que la désertification de certaines terres à cause de l'augmentation des températures ou leur submersion liée à l'élévation du niveau des océans (Foley et al. 2011).

Par ailleurs, l'usage d'intrants chimiques pour la fertilisation et la santé des productions animales et végétales, la mécanisation ou encore l'irrigation sont autant de pratiques intensives qui ont permis d'augmenter les rendements, d'anticiper et de standardiser les productions au travers de la maîtrise des processus écologiques. En allant à l'encontre des processus qui conditionnent le bon fonctionnement des écosystèmes, ces dynamiques agraires ont conduit à une dégradation importante des paysages (Landis 2017). La destruction des écosystèmes pour un usage agricole (déforestation, drainage de tourbières, pollution chimique par exemple) cause une perte importante de biodiversité alors que cette dernière est la pierre angulaire des fonctions que fournissent les écosystèmes et dont dépendent les êtres vivants, humains et non humains (Matson et al. 1997, Loreau et al. 2001, Foley et al. 2007, 2011). La fonction de substrat nourricier des sols pour l'agriculture est ainsi altérée en raison d'une baisse de la fertilité, liée entre autres à l'érosion, à la destruction des organismes du sol ou à l'acidification (U.N.C.C.D 2019). Le déclin de la diversité biologique dans les systèmes agricoles impacte négativement un ensemble de fonctions écologiques essentielles pour la production agricole, telles que la pollinisation et la régulation des ravageurs et des maladies (Flynn et al. 2009, Gámez-Virués et al. 2015, Landis 2017). Outre ces impacts sur le milieu, qui sont en retour néfastes pour l'agriculture, l'intensification et l'expansion de cette dernière contribuent fortement au changement climatique en étant à l'origine de plus de 30 % des émissions de gaz à effet de serre ($CO_2$, méthane) et en réduisant drastiquement le potentiel de certains écosystèmes à stocker le carbone (par exemple la forêt) (Vergé et al. 2007, West et al. 2010).

Dans ce contexte, le terme de résilience, défini comme la "*capacité d'auto-organisation, d'apprentissage et d'adaptation d'un système socio-écologique*" (Sterk et al. 2017), est aujourd'hui largement employé pour aborder les doubles enjeux d'adaptation de l'agriculture face aux changements globaux et de la préservation des écosystèmes pour maintenir la viabilité sur Terre. **Mon travail de recherche vise à appréhender les enjeux de résilience dans les paysages agricoles de régions tropicales humides, c'est-à-dire des paysages qui se composent de forêts (de maturités différentes, plus ou moins dégradées) et d'espaces naturels ou semi-naturels non forestiers (Maginnis et Jackson 2005)**. Ce **travail se base sur une étude de cas, celle des paysages de la zone de Vavatenina sur la côte nord-est de Madagascar qui ne présentent plus aujourd'hui de forêts, et vise à analyser leur trajectoire originale au regard des différentes pressions liées aux changements globaux.**

## 2. DIVERSIFIER L'AGRICULTURE : QUELLE PLACE DANS LES DYNAMIQUES AGRAIRES DES REGIONS TROPICALES ?

### ♦Place des agricultures familiales et des cultures commerciales dans les dynamiques agraires et la déforestation

Dans les régions tropicales humides, les paysages ont été jusqu'au 20ème siècle majoritairement façonnés par les activités issues des agricultures familiales à petite échelle (cf. Encart 1 et pour simplifier la lecture seule l'expression "agriculture familiale" sera employée par la suite). Les sociétés rurales pratiquant ces formes d'agriculture vivent en étroite relation avec la forêt et reposent sur l'usage d'une grande diversité végétale intra- et interspécifique, cultivée ou non, qui leur permet de satisfaire divers besoins de consommation et de valoriser les potentialités biophysiques et climatiques hétérogènes de leur milieu (Raimond et al. 2020b). Les interactions entre les sociétés rurales et la diversité végétale donnent lieu à la co-production d'une large gamme de "contributions de la nature aux humains" (Nature Contributions to People, Díaz et al. 2018), matérielles et immatérielles. Les pratiques de gestion de la diversité végétale cultivée et les diverses formes d'interactions des paysan.ne.s avec le milieu ont construit au cours du temps un paysage en mosaïque. Cependant, cette mosaïque reflète des dynamiques agraires d'homogénéisation et de simplification dans de nombreuses zones tropicales telles que celles décrites plus généralement ci-dessus (Foley et al. 2011, Raimond et al. 2020a).

*Encart 1: Eléments de définition des agricultures familiales à petite échelle*

**Les agricultures familiales : multiformes et liant étroitement famille-agriculture**

Le pluriel est volontairement employé pour traduire les formes extrêmement diverses des agricultures familiales, même si elles se fondent sur des traits spécifiques qui les distinguent des autres formes - entrepreneuriale et patronale - sur la base de *"la place occupée par l'organisation familiale et par les modalités de contrôle du capital productif"* (Thirion et al. 2014). Les exploitations familiales se caractérisent ainsi par des *"liens organiques entre la famille et l'unité de production, et par la mobilisation du travail familial excluant le salariat permanent"*. Ces liens sous-entendent une intrication forte entre ce qui relève de la famille (patrimoine, logiques domestiques) et de l'exploitation (capital productif, stratégies paysannes), et qui régit les choix de répartition du travail et de sa rémunération, de la destinée des productions agricoles (vente ou autoconsommation) avec, dans le cas de la vente, la question de son usage (investissement, accumulation). La variabilité des combinaisons possibles de ces différents traits crée un gradient de formes organisationnelles auquel s'ajoute la diversité des contextes nationaux.

**L'importance de l'échelle des exploitations familiales**

La taille de l'exploitation est aussi souvent une caractéristique des agricultures familiales et qui importe beaucoup dans le cadre cette recherche qui s'intéresse uniquement à des agricultures à petite échelle (en anglais : *small-scale agriculture*, *smallholders farmers*) qui sont donc implantées sur de petites surfaces. Celles-ci représentent une part importante des exploitations agricoles dans le monde, elles cultivent plus de diversité et plus de produits destinés à l'alimentation (Figure 1-1) (Ricciardi et al. 2018). Dans leur étude menée sur 55 pays, Ricciardi et al. (2018) estiment que plus de 30 % de l'alimentation mondiale provient d'exploitations de moins de 2 ha. Elles contribuent donc significativement à la sécurité alimentaire mondiale en produisant de nombreuses cultures, consommées dans le pays d'origine (surtout des racines, des tubercules, des bananes plantains) mais aussi exportées (en particulier le riz, le coton, le cacao, le café, l'hévéa) et de produits issus de l'élevage surtout consommés localement (Samberg et al. 2016, Ricciardi et al. 2018).

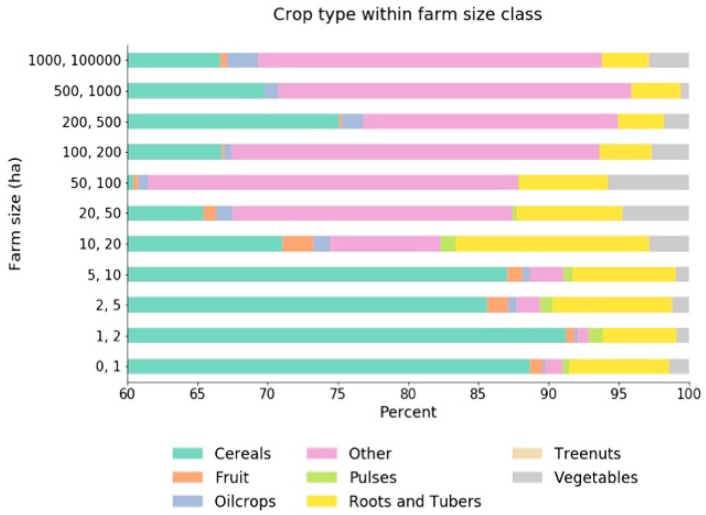



*Figure 1-1: Cortège des types de cultures dans chaque classe de taille d'exploitation, définie par rapport à la surface cultivée, de 55 pays. Figure extraite de (Ricciardi et al. 2018)*

De par les spécificités de leur contexte et de leur histoire, tous les paysages forestiers tropicaux se sont pas confrontés aux mêmes dynamiques agraires et n'évoluent donc pas de la même manière (Figure 1-2). Cependant, il peut être relevé certaines caractéristiques communes à leurs évolutions et qui soulèvent des enjeux de résilience similaires. Une première est celle de la conversion des forêts tropicales pour divers usages servant les besoins humains : l'exploitation minière, les exploitations illégale et légale de bois, le charbonnage, la production végétale et l'élevage, entre autres (FAO 2020). Le taux de conversion des forêts tropicales d'origine agricole est estimé à 17 % entre 1990 et 2020 (Vancutsem et al. 2021) et présente deux origines principales : la culture itinérante sur abattis-brûlis et l'implantation de formes d'agriculture industrielles et intensives (FAO 2020). Une autre caractéristique est celle du développement de cultures commerciales, c'est-à-dire des cultures dont les productions sont valorisées essentiellement par la vente à destination des marchés d'exportation. Ce développement a emprunté des trajectoires très disparates selon les contextes nationaux (socio-culturel, économique, politique et environnemental) et contribue à la déforestation. Ainsi, il n'est pas aisé d'en faire une description exhaustive mais il est important d'expliciter l'influence qu'il a eu sur les stratégies paysannes et sur l'évolution des paysages agricoles lorsque sont étudiés les enjeux de résilience.




*Figure 1-2: Exemples de paysages agroforestiers de zones tropicales humides : (A) un paysage agricole en zone forestière du Sud Cameroun (région du Littoral, Sanaga Maritime) dans lequel les différents modes d'exploitation et d'organisation sociale du travail (agro-industrie, élites et exploitations familiales) associés à la culture du palmier à huile construisent un paysage hétérogène (Martin 2016), (B) un front pionnier d'expansion du cacaoyer en Côte d'Ivoire (©M.Notaro) et (C) un paysage agricole dans une région de production de théiers au nord du Laos (©J.Mariel).*

Dans les zones tropicales forestières, l'agriculture sur abattis-brûlis est une forme d'agriculture de subsistance pratiquée par de nombreuses sociétés rurales (Cairns 2007, Pollini 2014). Elle repose sur un cycle en trois phases : défriche- brûlis de la forêt ou d'une repousse forestière, mise en culture, puis repos de la terre (c'est-à-dire mise en jachère) durant environ dix ans (durée variable selon la végétation et les conditions pédoclimatiques) pour renouveler correctement la fertilité du sol avant un nouveau cycle (FAO 1984, Nath et al. 2020). La durabilité de cette pratique extensive fut progressivement remise en question avec la hausse globale de la demande en produits agricoles (FAO 1984, Messerli 2003). En effet, l'augmentation de la demande en terres pour satisfaire les besoins d'une population croissante est à l'origine de deux phénomènes : le premier correspond au défrichage progressif de la forêt au profit de l'agriculture causé par l'avancement important du front de défrichement autour des zones d'habitations, le second est lié à la dégradation plus ou moins importante du sol résultant de la réduction du temps de jachère. En parallèle de cette origine agricole de la

déforestation, celle liée au développement d'exploitations agricoles entrepreneuriales[3] a souvent débuté avec la colonisation qui a transposé dans les pays colonisés des modèles agricoles occidentaux reposant sur une organisation entrepreneuriale et un modèle économique capitaliste (Barral et Ruf 2012, Thirion et al. 2014). Elles se sont par la suite maintenues et ont proliférés sous l'effet de l'intégration sur les marchés des pays tropicaux puis de la mondialisation. Avec des moyens de production (main-d'œuvre, capital, foncier) nettement plus importants que ceux de l'agriculture familiale, ces exploitations ont pu s'implanter facilement et étendre des plantations de cultures commerciales sur de grandes surfaces et souvent au détriment de la forêt. Deux exemples emblématiques de cette dynamique sont le cas de la production de palmiers à huile en Malaisie (Vijay et al. 2016) et celui du cacao en Côte d'Ivoire (Schroth et Ruf 2004).

Si l'histoire qu'entretiennent les régions tropicales avec le développement des cultures commerciales prend souvent racine à l'époque de la colonisation, elle ne se résume pas uniquement au travers de l'arrivée d'exploitations entrepreneuriales et de ses conséquences écologiques, sociales et économiques. Par ailleurs, cette histoire n'est pas uniforme entre les régions car très spécifique au contexte culturel et socio-économique local, et aussi dépendante du type de culture commerciale (toutes les espèces ne requièrent pas les mêmes conditions de culture et facteurs de production). Ainsi, les agricultures familiales des régions colonisées représentaient un moyen d'alimenter les chaînes d'approvisionnement en de nombreux produits exotiques à forte valeur ajoutée, comme le café, la vanille ou le cacao, mais aussi en toute une diversité de fruits (banane, litchi, noix de coco), d'épices (cannelle, poivre) ou encore d'oléagineuses (arachide, palmier à huile) (Volper 2011). L'adoption de ces cultures par les paysan.ne.s fut au début largement imposée par l'administration coloniale via une obligation de payer l'impôt de capitation : les cultures commerciales fournissaient les revenus monétaires nécessaires pour payer cette taxe (Jouve 1999, Raimond et al. 2020b). Par la suite, l'ouverture des pays colonisés à l'économie de marché a fortement joué sur le choix des paysan.ne.s de planter ce type de cultures (Godoy 1992). Ces facteurs économiques et politiques associés à la croissance démographique ont largement contribué aux processus de mutation de l'agriculture de subsistance, caractéristique des agricultures familiales, vers une agriculture reposant sur la monétarisation des productions. En résumé, dans un contexte de fortes pressions foncières, économiques et politiques, cultiver du café (par exemple) pour avoir des revenus avec lesquels s'acheter des produits de première nécessité devenait plus stratégique pour les paysan.ne.s que de développer une économie d'autosubsistance.

Cependant, ces mutations de l'agriculture familiale ont pris des formes différentes selon les contextes locaux et les types de culture. Dans certains pays tropicaux, si une partie des paysan.ne.s s'engagent dans la monoculture d'espèces commerciales en remplacement de la forêt (Andres et al.

[3] Également appelées "agriculture de firme" ou "exploitation industrielle", ces modes de production agricole reposent sur un modèle économique visant la rentabilité via des économies d'échelle, et une organisation hiérarchique de type entrepreneuriale, avec un patron et des salariés (Barral and Ruf 2012, Thirion et al. 2014).

2016, Stomph 2017), d'autres implantent ces cultures commerciales en maintenant une partie des espèces forestières locales pour bénéficier de leur ombrage, comme l'illustrent la production de cacao au Cameroun (Pedelahore 2014, Jagoret et al. 2018) ou de caféiers dans certaines zones des continents sud-américains et africains (Bart 2007, Douzant-Rosenfeld et Grandjean 2007). Dans d'autres pays, les paysan.ne.s ont créé des systèmes diversifiés et complexes associant des espèces vivrières, annuelles et pérennes, et/ou de l'élevage avec de l'hévéa en Indonésie (Penot 2001, Warren-Thomas et al. 2020) ou en Thaïlande (Jongrungrot et al. 2014), avec des cocotiers au Vanuatu (Lamanda 2005) ou avec des girofliers à Madagascar (Arimalala et al. 2019). La culture sur abattis-brûlis est aussi parfois abandonnée au profit de systèmes diversifiés associant des espèces commerciales et vivrières, en Inde (Nath et al. 2020), aux Philippines (Fujisaka 1986) ou en Indonésie (Aumeeruddy et Sansonnens 1994). Ces dynamiques agraires révèlent ainsi l'émergence de systèmes diversifiés de type agroforestiers, c'est-à-dire des systèmes dans lesquels des espèces "ligneuses pérennes (arbres, arbustes, palmiers, bambous, etc.) sont délibérément utilisées sur la même unité de gestion des terres que des espèces cultivées [non ligneuses] et/ou des animaux, soit dans une certaine disposition spatiale, soit dans une séquence temporelle" (Zomer et al. 2014). **En prenant le cas de la zone de Vavatenina à Madagascar, ma recherche illustre ce type d'évolution de l'agriculture familiale portée par les paysan.ne.s et caractérisée par des cortèges d'espèces vivrières et commerciales combinés à de l'élevage, et gérés selon une multiplicité de pratiques.**

*Encart 2: Eléments de définition de l'agroforesterie et classification des agroforêts*

L'agroforesterie existe depuis plusieurs milliers d'années, mais le concept a été formalisé tardivement et pour répondre à des enjeux liés à la foresterie et non à l'agriculture (Bene et al. 1977). Du fait de cette ambiguïté du concept, entre agronomie et foresterie, les scientifiques ont mis du temps avant de s'intéresser à l'agroforesterie en tant que pratique agricole. La première définition fut proposée par le Council of Research in Agroforestry en 1982 :

> *"Agroforestry is a collective name for land-use systems and technologies where woody perennials are deliberately used on the same land management units as agricultural crops and/or animals, in some form of spatial arrangement or temporal sequence. In agroforestry systems there are both ecological and economical interactions between the different components"*

Au sein de la communauté scientifique, il n'y a pas de classification et ni de définition consensuelles de l'agroforesterie (Torquebiau 2000) mais certaines externalités positives de cette pratique font consensus : la restauration de la fertilité, la réhabilitation de terres dégradées, la réduction de la pauvreté. L'agroforesterie n'est pas la solution miracle pour répondre aux différents enjeux actuels, c'est une option parmi d'autres qui présente également des contraintes fortes comme la compétition entre espèces et le temps de travail que requiert chaque culture.

Il existe plusieurs manières de classer l'agroforesterie (Torquebiau 2000). Une première, reposant sur les trois principaux types de production (cultures pérennes, non-pérennes, élevage), aboutit à distinguer trois formes d'agroforesterie : le sylvopastoralisme (association arbres-animaux), l'agrosylvopastoralisme (association arbres-animaux-cultures) et l'agrosylviculture (association arbres-cultures). Considérer la structure (c'est-à-dire l'agencement des espèces entre elles) permet d'obtenir une classification plus précise qui différencie notamment : les cultures sous couvert arboré (les parcs par exemple), les agroforêts (denses, diversifiées, multi-étages), l'agroforesterie séquentielle (l'agriculture itinérante sur brûlis par exemple) ou encore l'agroforesterie en disposition linéaire (implantation de haies par exemple). Cette manière de décrire les formes d'agroforesterie souligne davantage les synergies et les phénomènes de concurrence entre espèces.

♦**Quelles formes d'agricultures pour des trajectoires résilientes face aux changements globaux ?**

Aujourd'hui, les risques socio-économiques de stratégies paysannes centrées sur des cultures commerciales sont connus (Schroth et Ruf 2014, Anderman et al. 2014, Malard et al. 2014) ainsi que les impacts de la monoculture sur le milieu (Jose 2009, 2012). Depuis longtemps, la communauté scientifique alerte sur la dégradation des écosystèmes et sur les émissions de gaz à effet de serre causées par la déforestation et la monoculture (Matson et al. 1997, Loreau et al. 2001, Foley et al. 2007, 2011, Flynn et al. 2009, West et al. 2010). Enfin, étant donné le poids important des agricultures familiales à petite échelle dans le monde et connaissant leur capacité à gérer durablement les ressources naturelles (Thirion et al. 2014, Samberg et al. 2016, Ricciardi et al. 2018), de nombreux auteur.e.s soutiennent qu'elles doivent être maintenues et renforcées car elles ont la capacité de développer des formes de production résilientes (Lin 2011, Altieri et Nicholls 2017). Cependant, dans ce contexte d'incertitudes et de changements globaux, les formes d'agricultures familiales qui conduiraient les systèmes socio-écologiques des paysages forestiers tropicaux vers des trajectoires résilientes restent peu décrites.

***

La section qui suit vise à donner des éléments de caractérisation de ces formes d'agricultures et en particulier celles reposant sur l'agrobiodiversité, définie comme la "*diversité des organismes vivants qui contribuent à l'alimentation et à l'agriculture*" (Qualset et al. 1995). A partir de la littérature, j'expliciterai en quoi l'agrobiodiversité renforce la capacité de l'agriculture à nourrir les humains tout en permettant de maintenir les multifonctionnalités des paysages et de faire face aux changements. Dans cet objectif, je décrirai les liens entre la diversification et la résilience, et je tenterai de répondre aux questions que soulèvent une agriculture basée sur l'agrobiodiversité, à savoir quelle diversité cultiver et maintenir (variétés, espèces, types botaniques, types d'usage par exemple) et à quelle échelle organisationnelle (parcelle, exploitation agricole, paysage par exemple) selon les caractéristiques biophysiques et climatiques du milieu (contraintes et potentialités), et selon les besoins des paysan.ne.s.

## 3. MOBILISER L'AGROBIODIVERSITE, DE LA PARCELLE AU PAYSAGE, POUR RENFORCER LA RESILIENCE

♦**L'agrobiodiversité : pierre angulaire de la résilience des écosystèmes et des agricultures familiales**

À partir de la définition de Qualset et al. (1995), deux formes d'agrobiodiversité peuvent être distinguées : l'agrobiodiversité "planifiée", c'est-à-dire volontairement introduite et/ou gérée par les paysan.ne.s (Vandermeer et Perfecto 1995), et l'agrobiodiversité "associée" qui s'établit spontanément dans l'écosystème (Altieri 2002). En relation avec les sept principes fondateurs de la résilience des systèmes socio-écologiques définis par Sterke et al. (2017), l'agrobiodiversité considérée à l'échelle de la parcelle et du paysage répond au principe reposant sur l'idée de "*maintenir la diversité et la redondance*"

car "*les éléments réagissent différemment au changement, et les différents éléments d'un système se compensent les uns les autres sur le plan fonctionnel*" (Sterk et al. 2017). Ainsi, en raison du rôle important de l'agrobiodiversité dans le fonctionnement et la dynamique des écosystèmes (Loreau et al. 2001, Vandermeer et al. 2002) et dans les moyens d'existence des agricultures familiales (Méndez et al. 2010, Reed et al. 2017, Díaz et al. 2018), elle est une pierre angulaire de leur résilience.

En se basant sur la littérature scientifique, les paragraphes qui suivent décrivent comment l'agrobiodiversité végétale, considérée à la fois à l'échelle de la parcelle et du paysage, contribue à la résilience des agricultures familiales. Pour simplifier la lecture, l'emploi du terme "agrobiodiversité" désignera par la suite l'agrobiodiversité "planifiée" de nature végétale, et les termes "associée" et "animale" seront précisés quand il le faudra.

### ♦Liens entre agrobiodiversité et résilience à l'échelle de la parcelle et de l'exploitation

> *"Associer dans une même parcelle des plantes aux exigences agrophysiologiques différentes s'explique par le souci de minimiser les risques de très mauvais résultats (si le climat d'une année ne convient pas à l'une des espèces cultivées, il peut néanmoins être favorable à l'une ou l'autre des cultures restantes)" (Dufumier 2006):*

Cette description de Dufumier concernant les agricultures familiales en Haïti permet de définir deux grands types d'effets de l'agrobiodiversité : (i) des effets sur le fonctionnement écologique de la parcelle qui relèvent des interactions plantes-milieu et qui contribuent à la résilience écologique et climatique, et (ii) des effets sur le fonctionnement socio-économique de l'exploitation, relatifs aux caractéristiques des différentes productions agricoles (qualité, quantité, répartition dans le temps, usages) qui renforcent la résilience économique et la sécurité alimentaire.

Les effets sur le fonctionnement écologique de la parcelle

Les espèces cultivées par les paysan.ne.s ne requièrent pas les mêmes conditions de culture. Ainsi, entretenir une diversité d'espèces ou de variétés permet de valoriser l'hétérogénéité des conditions du milieu et d'utiliser de manière plus efficace les ressources dont il dispose : l'eau, le sol et la lumière notamment (Altieri 2002, Bazile et al. 2008, Abebe et al. 2010, Sahoo et Rocky 2015). De même, les espèces cultivées ne répondent pas de la même manière à une perturbation ou à un changement dans l'environnement, par exemple relatif au sol ou au climat. L'agrobiodiversité permet aux paysan.ne.s de faire évoluer leurs cortèges d'espèces et de variétés en fonction de leur capacité d'adaptation aux nouvelles conditions environnementales et en particulier au changement climatique (Altieri et Nicholls 2017, Labeyrie et al. 2021b, Ruggieri et al. 2021).

L'agrobiodiversité comprend des espèces végétales qui permettent de créer des conditions agroécologiques favorables aux cultures. C'est notamment le rôle des arbres d'ombrage qui réduisent la quantité de lumière arrivant sur les cacaoyers, les caféiers ou encore les pieds de vanillier dans les

agroforêts (Cerda et al. 2017, Notaro et al. 2020, Martin et al. 2020). De nombreuses espèces sont bénéfiques pour la fertilité du sol via un effet sur les nutriments, comme les espèces légumineuses qui apportent de l'azote (Altieri 1986), mais aussi sur le cycle de ces nutriments (Sharma et al. 1995, 2009). Les feuilles caduques des arbres nourrissent la litière du sol et contribuent à la formation de l'humus dont la richesse en matière organique est indispensable à la croissance des végétaux (Dale et al. 2015, Cassart et al. 2020). Plus généralement, l'agrobiodiversité, et en particulier les arbres, a de nombreux effets positifs sur l'écosystème de la parcelle (Jose 2009) : stockage du carbone (Albrecht et Kandji 2003, Ehrenbergerová et al. 2016), effet brise-vent, création de microclimats, atténuation de l'évaporation de l'eau du sol grâce aux feuillages (Lin 2007, Lasco et al. 2014), augmentation de la diversité et de l'abondance des organismes du sol, entre autres.

Par ailleurs, cultiver une diversité d'espèces et de variétés a des effets sur l'agrobiodiversité "associée" qui sont bénéfiques en retour à ces espèces cultivées (Isbell et al. 2017). Par exemple, la richesse floristique apportée par la diversité cultivée favorise différents types d'insectes pollinisateurs dans l'espace et dans le temps (Garibaldi et al. 2014, Isbell et al. 2017) : plus il y aura d'espèces florifères, plus il y aura de moments de floraison, répartis séquentiellement et spatialement, pour attirer des pollinisateurs de cultures. Des effets sur les ravageurs et sur les maladies ont aussi été démontrés (Isbell et al. 2017). Concernant les herbivores par exemple, la présence de plusieurs espèces végétales permet de répartir la ressource alimentaire et donc de diminuer la pression sur chaque espèce et sur chaque individu (Isbell et al. 2017). Dans un mélange diversifié d'espèces et de variétés, les plantes peuvent aussi attirer des espèces qui permettent de réguler les ravageurs et les maladies (Schroth et al. 2000, Isbell et al. 2017). Plus généralement, de nombreuses études montrent que les monocultures sont plus sensibles aux ravageurs et aux maladies que les systèmes diversifiés (Schroth et al. 2000, Pumariño et al. 2015, Isbell et al. 2017). Par ailleurs, l'agrobiodiversité, qu'elle soit gérée dans l'espace ou dans le temps, a aussi des effets sur les adventices (Pumariño et al. 2015, Isbell et al. 2017) qui, par exemple, ne trouvent plus les conditions favorables à leur croissance en présence de certaines espèces "planifiées".

Dans les régions tropicales humides, l'agroforesterie est une pratique répandue qui mobilise une grande diversité d'espèces "planifiées" (Bene et al. 1977, Nair 1991, Abebe et al. 2013, Notaro et al. 2020, Danthu et al. 2022). Comme cela vient d'être décrit, dans cette agrobiodiversité, les arbres jouent un rôle agroécologique important à l'échelle de la parcelle (Jose 2009, Cerda et al. 2017). Ainsi, quand les conditions sont adaptées, plusieurs travaux appellent au développement de l'agroforesterie pour concilier de manière résiliente l'expansion de l'agriculture et des cultures commerciales avec la préservation des écosystèmes tropicaux (Jose 2009, 2012, Buttoud 2013, Mbow et al. 2014a, Reed et al. 2017, Miller et al. 2020).

Les effets sur le plan socio-économique

Cultiver la diversité permet d'échelonner les récoltes sur toute l'année ce qui a pour effet d'augmenter et de stabiliser les rendements (Clough et al. 2011, Isbell et al. 2017a, 2017, Renard et Tilman 2021). Ces conséquences sur les rendements et la nature diversifiée des récoltes se répercutent positivement sur les moyens d'existence des ménages agricoles et sur leur résilience (Méndez et al. 2010, Reed et al. 2017, Díaz et al. 2018, Miller et al. 2020, Labeyrie et al. 2021b, Mariel et al. 2021b).

D'un point de vue économique, la valeur globale d'une parcelle diversifiée est augmentée et cela pas seulement grâce aux espèces valorisées par la vente, mais aussi grâce aux espèces auto-consommées : la valeur d'autoconsommation des espèces autres que les cultures commerciales, comme les arbres d'ombrage et les fruitiers, représente une économie significative pour les ménages (Rice 2008, Notaro et al. 2020, Mariel et al. 2021b). Par ailleurs, la diversification des espèces vendues permet de mieux répartir les revenus dans le temps et donc de stabiliser les économies des familles agricoles (Schroth et Ruf 2014, Anderman et al. 2014, Hougni et al. 2018, Mariel et al. 2021b). En cas d'aléas économiques, la présence de plusieurs espèces valorisables par la vente permet aux paysan.ne.s d'adapter leurs stratégies, par exemple à Madagascar en produisant plus d'huile essentielle (Droy et al. 2017, Mariel et al. 2021b), en valorisant les variétés sauvages de palmier à huile dans les cacaoyères de Côte d'Ivoire pour produire du vin de palme (Ruf 2014) ou en vendant les fruits et le bois cultivés dans les agroforêts à hévéas en Indonésie (Stroesser et al. 2018).

Au regard des conditions de vie et du bien-être des populations, l'agrobiodiversité permet de satisfaire de nombreux besoins d'autoconsommation : alimentation , bois de construction et bois de feu, plantes médicinales, et sparterie notamment (par exemple Figure 1-3) (Duguma 2010, Méndez et al. 2010, Díaz et al. 2018, Miller et al. 2020). En particulier, elle joue un rôle important dans la sécurité alimentaire (Thrupp 2000, Waha et al. 2018) et dans la diversification des régimes alimentaires (Remans et al. 2014). Lorsque plusieurs espèces remplissent un même besoin, cela donne aux paysan.ne.s une capacité d'adaptation en réponse à des perturbations et permet ainsi de "*minimiser les risques de très mauvais résultats*" (Dufumier 2006). Dans l'agrobiodiversité, de nombreuses espèces sont aussi associées à des valeurs symboliques et à des usages qui caractérisent l'identité culturelle des sociétés rurales (Carrière 2002, UNESCO 2017, Congretel 2017).

Cependant, la présence de plusieurs espèces végétales dans une même parcelle peut aussi avoir des effets négatifs impactant certaines cultures pour lesquelles les paysan.ne.s cherchent à maximiser leurs rendements. Ces effets résultent principalement de phénomènes de compétition pour les ressources (nutriments du sol, eau, lumière par exemple) (Salazar-Díaz et Tixier 2019, Martin et al. 2020, Notaro et al. 2021) mais sont aussi dus à des ravageurs ou à des maladies que les espèces associées aux cultures d'intérêt attireraient et qui seraient néfastes pour ces dernières. Outre ces externalités négatives de nature agroécologique, la diversification à l'échelle de l'exploitation représente des contraintes pour les paysan.ne.s, notamment en termes de quantité de travail à allouer à chaque culture (plantation ou semis, entretien, récolte, valorisation par exemple) et de répartition de ces temps de travail dans le calendrier annuel (Ruf et Schroth 2014).




*Figure 1-3: Diversité d'espèces comestibles cultivées par des paysan.ne.s Betsimisaraka et vendues sur les marchés locaux, côte Nord-Est de Madagascar (©J.Mariel) : (A) jeunes pousses de* Dracaena reflexa, *(B) patates douces* Ipomoea batatas, *(C) variété d'aubergine* Solanum melongena, *(D) en haut à gauche du concombre* Cucumis sativus, *en haut à droite des feuilles de* Silanthes oleracea, *en bas à gauche des bottes de* Brassica rapa (pekinensis), *en bas à droite des fruits de* Solanum macrocarpum, *(E) papaye* Carica papaya, *(F) épis d'une variété de maïs* Zea mays, *(G) feuilles de taro* Colocasia esculenta, *(H) feuilles de manioc* Manihot sp., *(I) en bas à gauche des courgettes* Cucurbita pepo, *en bas au milieu des fruits de* Luffa acutangula, *en bas à droite des concombres, (J) chayote,* Sechium edule

### ♦Liens entre agrobiodiversité et résilience à l'échelle du paysage

À l'échelle du paysage, l'agrobiodiversité est présente dans les espaces dédiés aux activités agricoles dont la végétation varie en composition et en structure, combinant ainsi des espèces annuelles et pérennes, des structures denses et complexes (agroforêts par exemple) et d'autres simplifiées et éparses (prairies, haies, parcs par exemple) (Tscharntke et al. 2012). Aux interstices de ces espaces cultivés se trouvent des espaces non cultivés hébergeant une grande diversité d'espèces, animales et végétales (forêts, friches par exemple). Ces différents modes d'occupation et d'usage du sol, et la manière dont ils sont agencés dans le paysage sont des facteurs de son hétérogénéité (Fahrig et Nuttle 2005). Cette hétérogénéité est une caractéristique clé du fonctionnement écologique des paysages agricoles (Fahrig et Nuttle 2005, Fahrig et al. 2011, Duarte et al. 2018). Ainsi, la simplification et

l'homogénéisation des paysages ont, le plus souvent, des effets délétères sur la biodiversité et sur les processus écologiques, et nuisent donc à la résilience des paysages (Fischer et al. 2006, Perfecto et al. 2019).

En recréant certaines conditions analogues à celles des forêts, les agroforêts et les plantations forestières, bien que moins diversifiées, peuvent être des habitats pour des espèces animales : elles contribuent ainsi à leur préservation dans les paysages agricoles (Perfecto et al. 1996, Griffith 2000, Bhagwat et al. 2008, Martin et al. 2012, Jose 2012, Guzmán et al. 2016, Velásquez-Valencia et al. 2019). Selon comment ils sont gérés, les systèmes diversifiés constituent des banques de graines : ces graines peuvent être des sources alimentaires pour de nombreuses classes d'espèces animales (insectes, rongeurs, oiseaux par exemple) et leur circulation dans le paysage participe au maintien de la biodiversité végétale (Randriamalala et al. 2015). Plus généralement, le rôle des arbres dans les processus écologiques a des implications importantes dans le fonctionnement des paysages agricoles en réduisant l'érosion des sols (Delgado et Canters 2012, Atangana et al. 2014), en favorisant la diversité des organismes du sol et des pollinisateurs (Barrios et al. 2018). Par ailleurs, maintenir des espaces non cultivés intégrés parmi les parcelles agricoles a des effets bénéfiques pour les cultures : leur végétation constitue des habitats pour une grande diversité d'ennemis naturels et représente des sources alimentaires pour les herbivores (Chaplin-Kramer et al. 2011) tout en offrant une richesse floristique en faveur d'une plus grande diversité et une abondance plus élevée de pollinisateurs des cultures (Garibaldi et al. 2011, Isbell et al. 2017).

L'agroforesterie est une pratique agricole qui permet de maintenir une diversité d'espèces animales et végétales contribuant aux processus écologiques et donc à la fonction de production des paysages agricoles (Harvey et González Villalobos 2007, Scales et Marsden 2008, Jha et Vandermeer 2010). Ainsi, pour les paysages dégradés par la déforestation et par des pratiques intensives (Parrotta 2002, Lamb et al. 2005), l'agroforesterie est aujourd'hui largement préconisée pour parvenir à la restauration de leurs fonctions écologiques, tout en intégrant les besoins des populations rurales et en renforçant leur résilience face aux changement globaux (Barral et al. 2015, Santos et al. 2019). Néanmoins, l'usage de cette pratique dans un objectif de restauration dépend fortement du contexte local (Hillbrand et al. 2017). Le contexte comprend notamment les facteurs favorisant la mise en œuvre de pratiques agroforestières (Shennan-Farpón et al. 2022) et les logiques paysannes d'intégration des agroforêts dans le paysage par rapport au milieu biophysique et aux autres modes d'occupations du sol (Clough et al. 2009, Velásquez-Valencia et al. 2019). Pour concevoir une restauration reposant sur l'agroforesterie, ce dernier aspect est essentiel à analyser car il détermine la structure du paysage et son hétérogénéité qui sont des facteurs déterminants pour le maintien des processus écologiques (Fahrig et al. 2011). **Cependant, peu de recherches se sont consacrées jusqu'à présent à comprendre comment l'agroforesterie contribue à l'hétérogénéité des paysages agricoles. La première partie de mon travail a donc visé à décrire la place de l'agroforesterie et son émergence dans les paysages de la zone de Vavatenina, ainsi que sa contribution à**

**l'hétérogénéité paysagère. Sur la base de cette analyse, je discute ensuite des implications de ces dynamiques agroforestières sur la restauration des paysages de cette zone.**

### ♦Mobiliser l'agrobiodiversité : quels enjeux ?

Mobiliser l'agrobiodiversité dans une parcelle agricole représente des enjeux importants liés à sa gestion : pour la maintenir il faut la reproduire, pour obtenir les effets escomptés sur les rendements il faut maîtriser les éventuels effets indésirés tels que la compétition sur les ressources du milieu et ses effets sur les rendements (Torquebiau 2000, Isaac et al. 2018). Un premier enjeu a trait à caractériser la composition de l'agrobiodiversité (Isbell et al. 2017), c'est-à-dire le cortège d'espèces et de variétés à implanter dans la parcelle et selon quelle abondance. En effet, la composition est le résultat de choix et de compromis faits par les paysan.ne.s pour obtenir des récoltes satisfaisantes tout en s'adaptant aux contraintes et en saisissant des opportunités (par exemple économiques).

La réalisation de certains compromis se traduit dans la manière d'organiser spatialement et au cours du temps l'agrobiodiversité (Ango et al. 2014, Vaast et Somarriba 2014, Notaro et al. 2020, 2021). Les pratiques d'organisation de l'agrobiodiversité sont donc un deuxième enjeu pour une gestion qui maximise les conditions de cultures dans l'espace et dans le temps, et favorise les effets positifs de l'agrobiodiversité sur le fonctionnement écologique de la parcelle (Isbell et al. 2017). Des compromis s'expriment aussi dans les stratégies paysannes qui recherchent d'une part à garantir une capacité d'adaptation à long terme et d'autre part à assurer une rentabilité à court terme (Darnhofer et al. 2010). Par ailleurs, les contraintes et les opportunités influencent les pratiques d'organisation, les stratégies paysannes et par conséquent la composition de l'agrobiodiversité. Comme cela a pu être décrit plus haut, l'agrobiodiversité est un moyen de pallier les contraintes biophysiques en raisonnant l'adaptation des espèces cultivées et des modes d'usage du sol selon l'hétérogénéité du milieu à ces différentes échelles spatiales : la parcelle et le paysage. **La majorité des travaux sur les questions de diversification se focalise sur une échelle spatiale donnée (parcelle, exploitation ou paysage) ce qui donne une vision partielle de ces processus. Mon travail de recherche analyse donc comment l'agrobiodiversité est mobilisée et organisée par les paysan.ne.s à ces différentes échelles pour répondre aux changements socio-économiques auxquels iels font face et pour s'adapter aux conditions biophysiques du milieu.**

***

Les pratiques paysannes qui déterminent la composition et l'organisation de l'agrobiodiversité reposent sur les connaissances que détiennent les paysan.ne.s sur les plantes, sur leurs interactions entre elles et avec le milieu biophysique. La section qui suit (chapitre 1.4) décrit ainsi en quoi ces connaissances paysannes sont une composante cruciale de la gestion de l'agrobiodiversité. Un autre enjeu de la gestion se trouve dans la capacité des paysan.ne.s à maintenir et à faire évoluer l'agrobiodiversité, que ce soit à l'échelle de leur parcelle ou à celle du paysage (Isbell et al. 2017). L'accès

au matériel végétal à cultiver (c'est-à-dire des propagules) et aux connaissances nécessaires à sa gestion peut ainsi représenter une contrainte (limitant) ou une opportunité (favorisant) pour la diversification des parcelles et du paysage. Ce troisième enjeu sera donc abordé dans la dernière section de ce chapitre (chapitre 1.5).

## 4. GERER L'AGROBIODIVERSITE GRACE AUX CONNAISSANCES PAYSANNES SUR LES INTERACTIONS PLANTES-MILIEU

### ♦Le rôle des connaissances paysannes locales dans la résilience des agricultures familiales

De nombreux termes existent pour désigner les connaissances, en fonction de qui les détient, du domaine auquel elles appartiennent et de l'histoire dans laquelle elles s'inscrivent. Je privilégie le terme de "connaissance" à celui de "savoir" car elles "*sont variables d'un individu à l'autre*", "*se construisent et se transforment en actions*", "*sont des représentations du monde*" et "*s'inscrivent dans l'histoire et la dynamique de construction/reconstruction des sujets*" (Barbier 2018). Par ailleurs, j'emploierai "local" et non "traditionnel" pour englober les connaissances nouvellement acquises, utilisées et reproduites au sein d'une société vivant dans un contexte local spécifique (Jacobi et al. 2017). **Dans cette recherche, je m'intéresse aux connaissances locales sur les plantes, sur leur milieu biophysique et sur leurs interactions mutuelles.**

Je définis les connaissances locales étudiées comme étant "*a cumulative body of knowledge, practice and belief, evolving by adaptive processes and handed down through generations by cultural transmission*" (Berkes et Usher 2000). Cette définition met en évidence deux aspects importants des connaissances locales justifiant qu'elles relèvent de diverses "*formes de syncrétisme*" et "*d'hybridation*" (Jankowski 2014): leurs différentes dimensions (théorique et empirique) (Figure 1-4) et leur caractère dynamique, sous l'effet des processus d'apprentissage et de transmission, et de l'évolution du contexte local (Altieri 1986, Jankowski et Lewandowski 2017).

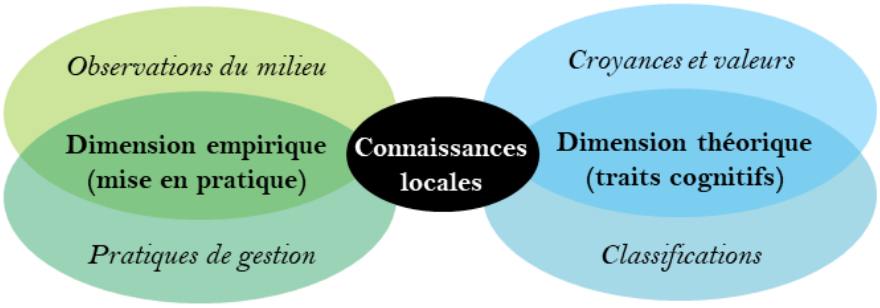



*Figure 1-4: Les différentes dimensions des connaissances locales. La dimension empirique se rapporte à un ensemble d'observations sur l'environnement et de pratiques de gestion gouvernant l'usage des ressources naturelles (Reyes-García et al. 2007). La dimension théorique, qui relève davantage de traits cognitifs, se décline en deux systèmes : celui des classifications des objets et des évènements (Berlin et Stevens 1994) et celui des croyances et des valeurs relatives à l'environnement (Berkes et Henley 1997).*

En vivant quotidiennement en interaction avec leur environnement, les paysan.ne.s en ont une compréhension holistique (Berkes et Berkes 2009) : elle résulte de l'observation et de la lecture qu'iels font en continu de leur environnement et qui génèrent sans cesse de nouvelles informations. L'intégration de ces informations à leurs connaissances théoriques et empiriques leur permet de les faire évoluer en réponse à des changements, de les adapter à l'hétérogénéité spatiale et temporelle de l'environnement, et ainsi d'utiliser durablement les ressources naturelles (Berkes et al. 2000, Folke 2004). Face aux changement globaux, les connaissances locales ont donc un rôle crucial dans la résilience des interactions entre les agricultures familiales et les paysages dans lesquelles elles s'inscrivent (Altieri 2004, Marie et al. 2009). Les connaissances portant sur l'agrobiodiversité (par exemple les usages pour les humains et les fonctions écologiques) et les interactions entre espèces (synergies et compétitions) et avec le milieu ont notamment un rôle fondamental (UNESCO 2017). Toutes ces connaissances influent donc sur la composition et sur l'organisation de l'agrobiodiversité "planifiée" et "associée" aux différentes échelles spatiales (Garibaldi et Turner 2004, Quave et Pieroni 2015, Labeyrie et al. 2021b).

### ♦Une diversité de connaissances pour une gestion plurielle en adéquation avec les spécificités locales

Les paysan.ne.s effectuent des compromis concernant l'agrobiodiversité "planifiée" et "associée" à maintenir dans leurs parcelles en considérant de nombreux aspects (Nordhagen et al. 2017): le rôle de l'espèce dans le fonctionnement agroécologique de la parcelle, son adaptation au milieu et à ses changements (par exemple Anglaaere et al. 2011, Rigal et al. 2018), son utilité pour le ménage en lien avec la satisfaction de besoins alimentaires ou non (par exemple Quave et Pieroni 2015), ou encore sa place dans leur mode de vie et dans leur culture, pouvant se traduire par une valeur symbolique ou par une préférence personnelle (Angé et al. 2018, Allen et al. 2018).

Des études d'ethnoécologie mettent en lumière la diversité des usages que les paysan.ne.s font de l'agrobiodiversité : alimentation des humains et des animaux, plantes médicinales, bois de feu et de construction, ornementation, artisanat, vannerie, cérémonies traditionnelles, entre autres (par exemple Figure 1-5, Byg et Balslev 2001, Carrière et Castro Carreno 2003, Congretel 2017, Rimlinger et al. 2021). Ces usages et leur importance diffèrent entre les individus et selon les communautés, ce qui contribue à une répartition hétérogène de la diversité cultivée que ce soit au niveau de l'exploitation ou du paysage agricole (Bellon 1991, Hillyer et al. 2006, Atran et Medin 2008). Ces usages ont donc un rôle déterminant dans la composition de l'agrobiodiversité en termes de diversité et d'abondance. L'importance que chaque paysan.ne accorde individuellement à une espèce et les préférences personnelles sont aussi des facteurs influents et sources de variabilité (Caillon et Lanouguère-Bruneau 2005, Jagoret et al. 2014, Valencia et al. 2015, UNESCO 2017). Ces préférences qui relèvent aussi de considérations pratiques (par exemple la facilité d'accès selon la fréquence d'usage) jouent également sur l'organisation spatiale des plantes (Méndez et al. 2001).




*Figure 1-5: Divers usages de l'agrobiodiversité des agroforêts de la côte nord-est de Madagascar (©J.Mariel). (A) Tronc d'arbre mort creusé pour y loger un essaim d'abeilles et construire une ruche. (B) Produit de la presse des fruits du palmier à huile,* Elaeis guineensis, *porté à ébullition pour faire évaporer l'eau et séparer la matière solide de l'huile. (C) Empaquetage de portions individuelles de riz avec des feuilles* d'Aframomum angustifolium *lors d'une cérémonie de retournement des morts (Tsabohara). (D) Séparation des différentes composantes des feuilles de palmier* Rafia farininfera *pour la fabrication de ficelle. (E) Séchage des tiges de* Lepironia mucronata *utilisées pour la vannerie. (F) Chaire de noix de coco râpée (*Cocos nucifera*) utilisée pour la préparation de l'huile servant aux femmes de soin nutritif pour leurs cheveux. Fabrication en bambou (*Bambusa *sp.*) de (G) verres et de louches, de (H) barrière et de (I) paniers (*sobika*).*

Les paysan.ne.s jouent aussi sur la composition de l'agrobiodiversité de leurs parcelles en fonction des effets qu'auront certaines espèces sur le milieu biophysique et qui seront bénéfiques pour d'autres. La connaissance de ces impacts, directs ou indirects, sur les conditions agroécologiques amène les paysan.ne.s à introduire, à supprimer ou à maintenir certaines espèces et pas d'autres. Dans le cas des agroforêts dont l'espèce clé est une culture commerciale (caféier, cacaoyer par exemple), les arbres associés sont sélectionnés de manière à ce qu'ils créent les conditions environnementales idéales pour la bonne santé et la productivité des cultures, tout en fournissant d'autres biens matériels ou immatériels aux familles. Dans cette gestion, les paysan.ne.s mobilisent des connaissances portant par exemple sur l'ombrage fourni par ces arbres (Carrière et Castro Carreno 2003, Anglaaere et al. 2011, Pauli et al. 2012, Notaro et al. 2020), sur leur contribution à la fertilité du sol (Valencia et al. 2015) et plus spécifiquement sur leurs effets dans le cycle des nutriments ou dans la décomposition de leurs feuilles (Grossman 2003, Pauli et al. 2012). Ces connaissances sous-tendent donc des pratiques d'association qui permettent de créer des conditions favorables aux cultures. De même, les pratiques d'organisation spatiale des espèces selon l'hétérogénéité du milieu (Méndez et al. 2001, Abebe et al. 2010), en particulier celle du sol et de sa fertilité (Bazile et al. 2008, Junqueira 2015), témoignent à la fois des connaissances sur les exigences pédoclimatiques des espèces, mais aussi des connaissances sur les propriétés du sol (Moges et Holden 2007, Karltun et al. 2013) et son niveau de dégradation (Moges et Holden 2007, Padonou et al. 2014).

L'agrobiodiversité "planifiée" et celle "associée" jouent aussi le rôle de bioindicateurs (Carrière et al. 2005, UNESCO 2017) auxquels les paysan.ne.s se réfèrent pour réaliser, pour modifier ou pour ajuster leurs pratiques de sélection et d'organisation de l'agrobiodiversité. Par exemple, les caractéristiques phénotypiques des feuilles donnent des indications sur les traits fonctionnels des arbres, sur ses conditions de culture ou encore sur son état de santé, qui sont utilisées par les paysan.ne.s pour modifier leurs pratiques de gestion (Isaac et al. 2018). Dans le cas de l'agriculture sur abattis-brûlis, les paysan.ne.s observent la macrofaune du sol (Pauli et al. 2012) ou la composition en plantes de la jachère (Styger et al. 2007, Dawoe et al. 2012) pour évaluer le niveau de régénération de la fertilité du sol avant de relancer un cycle de culture. À l'échelle du paysage, ces mêmes connaissances permettent aux paysan.ne.s de choisir quelles espèces mettre dans leur parcelle en fonction des conditions qu'offre sa localisation dans le paysage (Blanc-Pamard 1986, Aumeeruddy et Sansonnens 1994, Blanc-Pamard et Rakoto Ramiarantsoa 2000).

En étant en interactions quotidiennes avec leur environnement, les paysan.ne.s développent des connaissances approfondies qui se situent à la base de leurs pratiques agricoles, et au cœur de compromis et de stratégies leur permettant de gérer durablement les ressources naturelles. Une part grandissante de la communauté scientifique défend la nécessite de considérer les connaissances paysannes pour renforcer la résilience des agricultures familiales (Berkes et al. 2000, Altieri 2004, Folke 2004, Jacobi et al. 2017). **Cependant, cette littérature se focalise largement sur les connaissances qualifiées de "traditionnelles". Peu d'études s'intéressent en effet à la dimension**

**plurielle et hybride de ces connaissances issues de diverses sources et processus de "coévolution" et de métissage avec les systèmes sociaux-écologiques (Altieri 1986). Par ailleurs, l'analyse des connaissances locales concernant les interactions entre espèces, ainsi qu'entre ces dernières et leur milieu, a fait l'objet de peu d'études car la majorité des travaux se consacre souvent à une seule espèce végétale. En étudiant plus spécifiquement les agroforêts à girofliers, mon travail de recherche vise à caractériser les connaissances locales mobilisées par les paysan.ne.s dans la gestion de l'agrobiodiversité au sein des paysages agroforestiers et, pour cela, il s'intéresse à différentes espèces et il considère la dimension dynamique de ces connaissances.**

***

Gérer l'agrobiodiversité, c'est également pouvoir la reproduire, la maintenir et la faire évoluer dans un contexte de changements. La section suivante aborde cette composante de la gestion en s'intéressant aux processus d'acquisition et de circulation de propagules (c'est-à-dire tout type de matériel végétal pouvant être utilisé pour multiplier une plante) et de connaissances entre paysan.ne.s et communautés rurales, ainsi qu'aux facteurs influençant ces processus.

## 5. ACCEDER AUX PLANTES ET AUX CONNAISSANCES POUR MAINTENIR ET FAIRE EVOLUER L'AGROBIODIVERSITE

Les parcelles diversifiées telles que les agroforêts mobilisent des ressources biologiques, (le matériel végétal à cultiver) mais aussi des ressources immatérielles, c'est-à-dire les connaissances relatives à la gestion des espèces, qu'elles soient "planifiées" ou "associées". L'accès des paysan.ne.s à ces ressources conditionne donc leur capacité à maintenir l'agrobiodiversité et à la faire évoluer en fonction du contexte et en réponse à des perturbations (Coomes et al. 2015). Cet accès dépend de la disponibilité de ces ressources, pouvant provenir directement du milieu et/ou d'entités sociales, et de la manière dont elles circulent. Ainsi, les relations sociales qu'entretiennent les paysan.ne.s avec des pairs ou avec d'autres acteurs, et les facteurs influençant ces relations, sont des composantes importantes de la gestion de l'agrobiodiversité (Jackson et al. 2007, Duru et al. 2015). Plus généralement, les réseaux relationnels des paysan.ne.s contribuent à déterminer leur résilience (Adger et al. 2002, Rockenbauch et Sakdapolrak 2017, Ruggieri et al. 2021) car "*la connectivité fournit des liens vers des sources de diffusion ("colonization" en anglais), d'information et de cohésion sociale après des changements*" (Sterk et al. 2017). L'approche par les réseaux relationnels multi-acteurs permet donc d'étudier ces relations et de voir comment elles influent sur l'agrobiodiversité et sa gestion (Labeyrie et al. 2021a).

En se référant à des études portant sur les réseaux de propagules ou de connaissances, les sections qui suivent donnent un aperçu de l'influence de leurs modes d'acquisition et de circulation sur la gestion de l'agrobiodiversité (composition, organisation). Dans l'objectif d'appréhender les liens

entre ces modes d'accès et de circulation, et la résilience, le dernier paragraphe met en avant les études qui soulignent le rôle des connaissances et du matériel végétal exogènes (c'est-à-dire extérieurs à une communauté rurale) dans les dynamiques de l'agrobiodiversité et de sa gestion.

### ♦Réseaux de propagules et gestion de l'agrobiodiversité

Pour reproduire ou pour multiplier une espèce végétale, les paysan.ne.s peuvent avoir recours à différentes méthodes et propagules selon la biologie de la plante : semences, boutures, marcotte, plantules par exemple (Figure 1-6) (Coomes 2010). Iels peuvent s'auto-approvisionner, ou encore s'approvisionner auprès d'une tierce personne (pair ou autre acteur), d'une pépinière ou d'une banque communautaire de semences (Porcuna-Ferrer et al. 2020), d'un marché (Wencelius et Garine 2014, Ruggieri et al. 2021), auprès d'organisations de développement agricole, tels que les ONG ou les services d'appui agricole nationaux (Ruggieri et al. 2021) ou encore auprès d'acteurs privés (McGuire et Sperling 2016). Ces différents modes d'approvisionnement et de circulation de propagules contribuent à la conservation et à l'évolution de l'agrobiodiversité, depuis l'échelle de la parcelle des paysan.ne.s jusqu'à celle du paysage dans lequel iels vivent (Zimmerer 2003, Thomas et al. 2011, Pautasso et al. 2013, Samberg et al. 2013).




*Figure 1-6: Technique de bouturage du litchi* (moso) *(©J.Mariel). (A) Préparation de la branche de litchi* (Litchi chinensis) *à bouturer : enrobage du rameau avec de la matière humique récoltée dans le puits formé par une fougère épiphyte (photo B, nom botanique non connu). (C)* Moso *prêt à être planté car de nombreuses radicelles se sont développées dans l'enrobage de matière humique.*

De nombreux facteurs peuvent influencer la circulation de propagules, pouvant ainsi limiter ou favoriser leur partage et leur diffusion au sein d'une communauté rurale ou plus largement d'une société. Par exemple, l'organisation d'une communauté en sous-groupes spatialement éloignés se traduit par une répartition non homogène et non aléatoire de la diversité cultivée du sorgho (Labeyrie et al. 2014). Les alliances matrimoniales entre groupes ethnolinguistiques différents favorisent des échanges de semences au-delà de la communauté villageoise, comme dans le cas d'une société patrilocale (Wencelius et Garine 2014), et donc le brassage génétique (Leclerc et Coppens d'Eeckenbrugge 2012). L'étude de Deletre et al. (2011) montre par exemple qu'une plus grande

diversité variétale du manioc circule dans le cas où la patrilocalité (c'est-à-dire quand l'épouse s'établit dans le village d'origine de l'époux) est associée à un système d'alliance matrilinéaire où ce sont les femmes qui "héritent" des propagules, par rapport à un système patrilinéaire où ce sont les hommes qui en héritent. L'homophilie (c'est-à-dire la tendance à fréquenter ses semblables) influence aussi la circulation de semences, avec par exemple les effets de l'appartenance ethnique (Labeyrie et al. 2016) ou ethnoreligieuse (Matouš et al. 2013), du genre (Abizaid et al. 2016) et surtout de la parenté (Kiptot et al. 2006, Deletre et al. 2011, Wencelius et Garine 2014) avec parfois une distinction de valeur accordée aux semences selon si elle ont été héritées du père ou de la mère (Wencelius et Garine 2014). Par ailleurs, d'autres travaux mettent en évidence que certains individus échangent plus que d'autres ce qui leur confère une place centrale dans la circulation. Cette position est parfois liée aux caractéristiques socio-économiques des ménages, comme la taille des parcelles qu'ils détiennent (Kawa et al. 2013) ou à leur niveau de richesse (Wencélius et al. 2016). Elle peut également provenir de normes sociales à l'origine d'une distinction des individus et de leur capacité à fournir des espèces socialement valorisées au sein de la communauté (Thomas et Caillon 2016).

### ♦Réseaux de connaissances et gestion de l'agrobiodiversité

Comme pour les propagules, les connaissances que détiennent les paysan.ne.s concernant l'agrobiodiversité et sa gestion peuvent provenir d'une tierce personne (pair ou autre acteur) ou d'une personne représentant une structure (Labeyrie et al. 2021a); mais elles peuvent également avoir été développées par les paysan.ne.s au cours de processus d'observation, d'imitation et d'expérimentation *in situ* qui sont fréquemment rencontrés au sein de sociétés rurales (Altieri 2004, Jankowski et Lewandowski 2017). La connexion entre paysan.ne.s et avec d'autres acteurs met en relation différents systèmes de connaissances (points de vue, compréhension du monde) ce qui permet la circulation de diverses connaissances théoriques et empiriques, leur partage, leur appropriation et leur hybridation (Reed et al. 2010). Cet apprentissage social joue donc un rôle important dans la gestion de l'agrobiodiversité et de son évolution, et participe significativement à l'adoption de nouvelles pratiques (Conley et Christopher 2001, Kiptot et al. 2006).

Les travaux portant sur les réseaux de conseils et de connaissances concernant l'agrobiodiversité sont pertinents pour mettre en évidence la diversité des sources mobilisées par les paysan.ne.s et aussi pour identifier les personnes jouant un rôle important dans la circulation. Ces personnes reflètent souvent des traits culturels de la société (Hoang et al. 2006, Calvet-Mir et Salpeteur 2016), telles que des modes de relation selon le genre (Camou-Guerrero et al. 2008, Cadger et al. 2016) ou encore les processus de transmission de connaissances (Warriner et Moul 1992, Kiptot et al. 2006). L'identification de ces personnes centrales permet aussi de mettre en avant les caractéristiques socio-économiques et culturelles qui confèrent à certain.ne.s paysan.ne.s un statut social les différenciant des autres et les positionnant comme des personnes clés dans la diffusion de connaissances (Boster et al. 1987). C'est le cas par exemple de personnes "expertes" qui, en plus de leur rôle dans la circulation,

ont aussi souvent un rôle dans la conservation de la diversité cultivée (Kawa et al. 2013, Abizaid et al. 2016).

### ♦Ressources exogènes et évolution de l'agrobiodiversité et de sa gestion

L'évolution et l'adaptation de la composition de l'agrobiodiversité et des pratiques agricoles impliquent souvent des ressources exogènes, humaines, matérielles ou immatérielles. Ces ressources peuvent avoir plusieurs histoires à l'origine de leur introduction et de leur diffusion au sein d'une communauté. Des paysan.ne.s peuvent les avoir ramenées de l'extérieur dans le cadre par exemple d'une migration (Scheffran et al. 2012, Greiner et Sakdapolrak 2013, Rockenbauch et al. 2019a, Mulyoutami et al. 2020) ou d'une mobilité locale pour aller au marché ou bien pour rendre visite à des proches dans des villages alentours. Par ailleurs, l'introduction de ces ressources n'est pas toujours à l'initiative des paysan.ne.s, mais parfois à celle d'organisations rurales locales (Isaac et al. 2007, Isaac 2012) ou de projet de développement (Cadger et al. 2016). Dans d'autres cas, ces ressources exogènes ont été apportées par des paysan.ne.s migrant.e.s (Isaac et al. 2014, Salpeteur et al. 2016). Ces différentes mobilités et les flux qu'elles génèrent construisent des réseaux qui permettent de connecter les paysan.ne.s et leur communauté (échelle locale) à d'autres acteurs et à d'autres communautés, pouvant se situer loin géographiquement et s'ancrer dans un contexte local différent.

Étudier ces réseaux étendus au-delà du local permet ainsi de mieux comprendre les modalités de diffusion et d'adoption de ces ressources exogènes (souvent qualifiées "d'innovation") au sein de communautés rurales. Plusieurs études montrent que les paysan.ne.s connecté.e.s à des sources de connaissances extérieures à la communauté (vulgarisateur, organisation rurale par exemple) ont plus tendance à appliquer de nouvelles connaissances dans leur gestion de l'agrobiodiversité (Kiptot et al. 2006, Rockenbauch et al. 2019a), à cultiver une grande diversité d'espèces (Kiptot et al. 2006) et à gérer ces espèces dans des systèmes différents et plus diversifiés (Isaac et Matous 2017). Plus généralement, ces études montrent que la connexion des paysan.ne.s avec l'extérieur est souvent un moteur de l'évolution des systèmes agricoles : dans le cas d'une connexion avec des individus éloignés géographiquement, elle joue un rôle dans l'adoption de nouvelles pratiques (Matouš et al. 2013, Wossen et al. 2013).

L'introduction de ressources exogènes par les paysan.ne.s et/ou leur connexion avec l'extérieur témoignent de leur mobilité, qu'elle soit quotidienne ou épisodique, longue ou courte, sur de faibles ou de grandes distances, et cette mobilité est constitutive de la résilience (Adger et al. 2002, Black et al. 2011, Sterk et al. 2017). Elle représente également un moyen pour les paysan.ne.s de changer de sources de propagules et de connaissances pour en trouver des mieux adaptées à une situation de changements socio-économiques ou environnementaux affectant leur contexte local (Sterly et Sakdapolrak 2016). Ces changements de stratégie contribuent à la dynamique des modes d'accès et de circulation qui confère aux paysan.ne.s une meilleure capacité d'adaptation aux aléas (Violon et al. 2016).

La recherche reconnaît aujourd'hui l'importance d'étudier les réseaux relationnels des paysan.ne.s pour comprendre leurs modalités d'accès aux propagules et aux connaissances, et pour renforcer leur capacité d'adaptation et de résilience (Tomich et al. 2011, Rockenbauch et Sakdapolrak 2017, Labeyrie et al. 2021a). **Cependant, encore peu d'études ont porté sur le rôle de ces modes d'accès et leur ouverture sur l'extérieur dans des dynamiques de diversification portées par des paysan.ne.s. Mon travail de recherche mobilise donc l'approche par les réseaux relationnels multi-acteurs pour analyser conjointement les modes d'acquisition et de circulation de propagules et de connaissances concernant des espèces d'agroforêts, et vise à discuter dans quelles mesures ils contribuent aux dynamiques agroforestières locales.**

# Chapitre 2 | CADRE DE RECHERCHE

## 1. PROBLEMATIQUE GENERALE ET APPROCHE GLOBALE

À partir d'un cas de paysages agroforestiers en transition sur la côte nord-est de Madagascar, cette recherche s'est construite autour de la problématique générale suivante : **Sur quels modes de gestion locaux de l'agrobiodiversité ces dynamiques agroforestières reposent-elles et en réponse à quels changements ?**

Par "gestion de l'agrobiodiversité", j'entends à la fois les pratiques liées à la composition et à l'organisation de l'agrobiodiversité, les connaissances paysannes qui sous-tendent ces pratiques et aussi les modes d'accès des paysan.ne.s aux propagules et aux connaissances. Ainsi, cette problématique générale se décline en trois sous-questions autour desquelles s'articulent l'ensemble des travaux présentés, et elle s'inscrit aussi dans une réflexion plus globale sur la résilience des interactions entre les agricultures familiales et les paysages tropicaux présentés en introduction : **Quelle est la place actuelle de l'agroforesterie dans les paysages et quels sont les déterminants socio-économiques et physiques ayant contribué à son émergence et à son développement ? Quelles sont les pratiques locales de gestion de l'agrobiodiversité dans les agroforêts et dans les paysages, et sur quelles connaissances reposent-elles ? Comment les paysan.ne.s accèdent-iels aux plantes et aux connaissances pour gérer leurs agroforêts et pour soutenir les dynamiques de diversification ?**

Cette recherche postule que les paysages agroforestiers étudiés résultent de pratiques de gestion locale de l'agrobiodiversité qui sont déterminées par les interactions entre différents facteurs (socio-économiques, écologiques, culturels) et intervenant à l'échelle locale et globale. De plus, ces interactions évoluent au cours du temps et induisent des changements de pratiques qui se répercutent sur les paysages. Plus précisément, mon travail s'appuie sur l'idée générale que la manière dont les paysan.ne.s gèrent l'agrobiodiversité dans leurs parcelles dépend : (i) de leurs connaissances sur le milieu physique, sur les espèces et sur leurs interactions mutuelles, (ii) des caractéristiques physiques

du milieu et de leur variabilité spatio-temporelle, (iii) de l'accès des paysan.ne.s au matériel végétal et aux connaissances concernant sa gestion, et (iv) de facteurs culturels, socio-économiques et politiques agissant à différentes échelles. Je considère par ailleurs que ces interactions dynamiques confèrent aux paysan.ne.s une grande capacité d'adaptation aux changements et, lorsqu'elles amènent au développement de pratiques durables comme l'agroforesterie, elles offrent aussi les modalités d'une meilleure résilience face aux changements.

Dans un même regard, vouloir saisir la complexité et la diversité des interactions entre une société rurale et son milieu, ainsi que les facteurs de leur évolution, implique d'adopter une approche interdisciplinaire. Dans le cadre de cette recherche, j'ai mobilisé les champs disciplinaires de l'agroécologie et de l'ethnoécologie desquels émanent les concepts et les méthodes employés.

> L'agroécologie est *"l'application des concepts de l'écologie à l'étude, la conception et la gestion des agroécosystèmes durables" (Altieri 1989)*

> L'ethnoécologie *"rassemble toutes les études qui décrivent les interactions des populations locales avec l'environnement naturel, y compris les sous-disciplines telles que l'ethnobiologie, l'ethnobotanique, l'ethnoentomologie et l'ethnozoologie" (Martin 1995)* et se définit plus largement comme *"la science qui étudie la façon dont les gens comprennent la relation entre les humains, les animaux, les plantes et les éléments physiques d'un environnement local" (Davidson-Hunt 2000)*

Ma recherche emprunte aux principes de l'agroécologie l'idée selon laquelle "l*es systèmes sociaux et écologiques ont coévolué ensemble de telle sorte que le maintien de chacun est tributaire des boucles de rétroaction entretenues avec l'autre*" (Altieri 1986) et que, dans cette coévolution, les connaissances théoriques et empiriques des paysan.ne.s ont un rôle essentiel car elles *"stimulent et régulent les interactions au sein du système socio-écologique"* (Altieri 1986). L'agroécologie cherche à faire dialoguer ces connaissances paysannes avec celles des scientifiques de manière à proposer des solutions pratiques aux enjeux de résilience de l'agriculture (Altieri 1986, 2004). L'ethnoécologie permet d'étudier les connaissances paysannes et de fournir des modalités de gestion durable de l'agrobiodiversité, de la parcelle au paysage, et en respectant les spécificités locales. Au-delà de ce socle disciplinaire, j'ai eu recours à d'autres domaines scientifiques spécifiques, ce qui m'a amenée à solliciter des personnes compétentes dans ces domaines et à travailler collectivement avec elles (entre autres : télédétection, écologie du paysage, pédologie, agroéconomie, statistique).

Pour construire ce dialogue entre le monde paysan et le monde scientifique, j'ai adopté une posture non normative et non hiérarchisante des connaissances et des personnes qui les portent (Hill et al. 2020) et une perspective émique (Olivier de Sardan 1998). Cette dernière signifie que j'ai recherché au mieux à centrer ma démarche scientifique sur le recueil de notions, de concepts et de conceptions locales largement partagées par les paysan.ne.s de la zone étudiée (Olivier de Sardan 1998). Par ailleurs, adopter une perspective émique pour étudier les connaissances paysannes théoriques et

empiriques permet d'être dans une recherche de compréhension holistique des "*codes sous-jacents aux discours et comportements*" (Olivier de Sardan 1998). En effet, l'idée n'est pas de comparer les connaissances locales avec celles des scientifiques pour trouver des éléments de correspondance qui auraient pour rôle de les "valider". L'intention est d'identifier entre ces deux formes de connaissances les liens à partir desquels construire un dialogue compréhensible par toutes et tous, et de manière à ce que chacun.e se l'approprie et le traduise en actions durables (Rojas 2009, Jankowski 2014). Par conséquent, les missions de terrain (5 mois au total) et l'immersion dans le village furent des éléments clés de mon travail, de même que les manières de collecter les données reposant sur des enquêtes individuelles, sur l'emploi d'outils interactifs aussi bien collectivement qu'individuellement, sur des discussions informelles ainsi que sur des observations participantes.

Dans ce souci de compréhension des conceptions paysannes relatives à l'environnement, j'ai accordé une grande importance aux termes employés, à leurs acceptions et aux images qui leur étaient associées, que ce soit dans l'élaboration des questions d'enquêtes que dans l'analyse des données et dans l'interprétation des résultats (emploi des termes et des expressions locales par exemple). Par ailleurs, la réalisation de plusieurs missions visait à construire une recherche combinant approche hypothético-déductive et inductive permettant de tester et d'ajuster des méthodes et des hypothèses, de préciser et d'approfondir certains résultats. Dans mes pratiques de recherche, j'ai aussi porté une attention particulière à la dimension éthique au travers de mes manières d'être et de faire, concernant notamment la communication avec les gens, la façon de leur présenter mon travail et de les impliquer directement ou indirectement (respect des règles locales, implication volontaire, consentement éclairé, respect du rythme local, restitution collective des résultats). Cette posture et cette démarche générale traduisent une volonté de changement de paradigme de la recherche pour le développement et une ambition d'applicabilité de mes travaux dans le cadre de projets et d'actions de développement.

## 2. PRESENTATION DU CAS D'ETUDE : UN VILLAGE DE LA COTE NORD-EST DE MADAGASCAR

### ♦Madagascar : enjeux de développement agricole, de préservation des écosystèmes et de résilience face aux changements globaux

Madagascar est une île de 587 000 km² située dans l'Océan Indien, à environ 400 km de la côte ouest du continent africain. Longue de près de 1600 km, l'île fait partie de la zone intertropicale, à l'exception de sa partie méridionale extrême qui s'étend au-delà du tropique du Capricorne (latitude : – 23° 26′ 12″) (Figure 2-1. A, Jahandideh-Tehrani et al. 2019). Dans cette zone intertropicale, les climats sont isothermes (la température varie peu tout au long de l'année) mais ils présentent une saisonnalité pluviométrique marquée, avec des mois secs et d'autres humides.

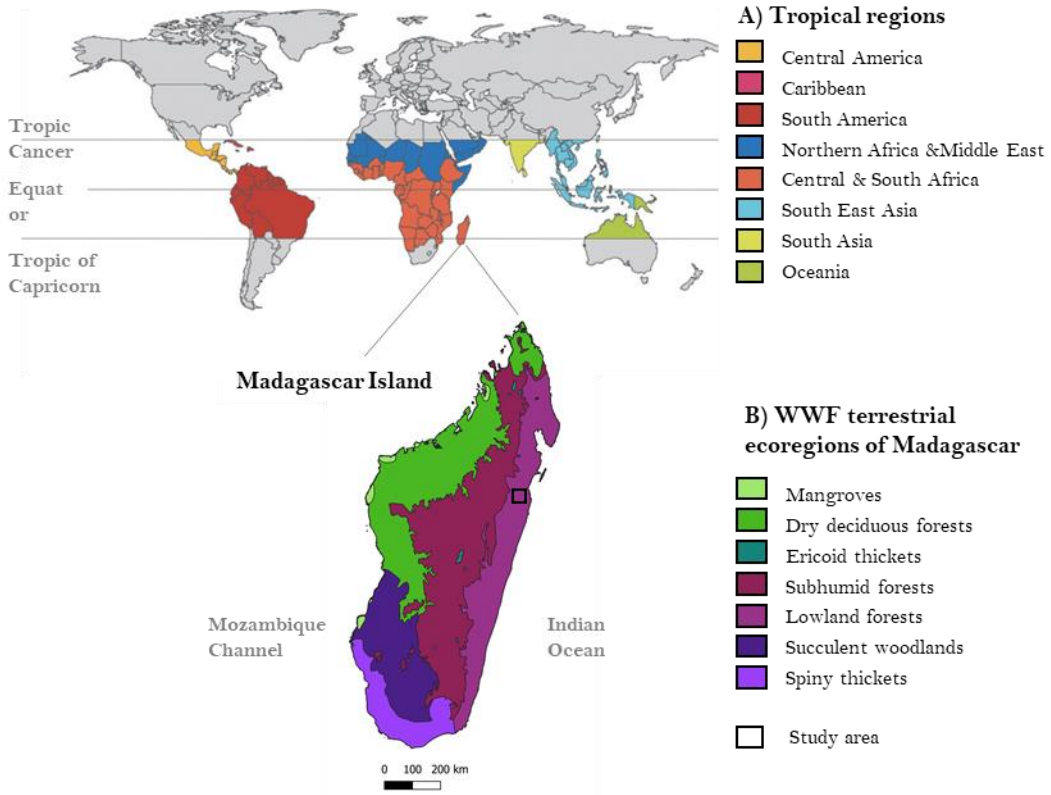



*Figure 2-1: (A) Localisation de Madagascar dans la zone intertropicale. (B) Régions bioclimatiques présentes à Madagascar. Ces régions reposent sur des critères biogéographiques.*
*(Source : https://www.worldwildlife.org/publications/terrestrial-ecoregions-of-the-world).*

Du fait de sa position géographique, Madagascar se situe sous l'influence de plusieurs climats selon des gradients Nord-Sud et Est-Ouest. Les interactions entre ces climats et le milieu physique créent des habitats aux conditions de vie très différentes ayant amené au développement d'écosystèmes singuliers (Figure 2-1). Par ailleurs, détachée des continents africain et indien il y a plusieurs dizaines de millions d'années, la majorité des espèces présentes sur l'île ont évolué de manière isolée conférant au pays un taux d'endémisme très élevé (près de 90 % des espèces) avec des espèces emblématiques telles que le baobab et le lémurien (Goodman et Benstead 2005). Cette endémicité et le taux de disparition d'espèces et d'écosystèmes natifs de l'île font de Madagascar un *hotspot* de biodiversité (Ganzhorn et al. 2001).

Les paysages de Madagascar témoignent de cette diversité climatique et écologique, et traduisent aussi la diversité culturelle de l'île, résultant d'une histoire ancienne de près de 8 000 ans d'interactions entre des groupes humains, issus de plusieurs vagues de migration originaires d'Afrique de l'est et d'Asie du sud-est (Pierron et al. 2017) et de leurs écosystèmes (Carrière et al. 2022, sous presse). Ces paysages sont façonnés par des agricultures familiales de petite taille (Encart 3) dont les singularités sont étroitement liées aux spécificités du milieu et aux ressources disponibles, même si le riz (aliment de base des Malgaches) représente la culture vivrière dominante (Dumont 1959, Le Bourdiec 1974, Dabat et al. 2008b, FAO 2018). Dans le cas des peuples habitant les zones forestières,

situées majoritairement le long de la côte est (Figure 2-1), les paysan.ne.s malgaches ont en commun la culture itinérante du riz sur brûlis, appelée localement *tavy* (Le Bourdiec 1974, Rabearimanana 1988, Aubert et al. 2003, Messerli 2003).

*Encart 3: Quelques précisions sur la situation des agricultures familiales à Madagascar*

L'agriculture familiale représente 99 % des exploitations agricoles de l'île (MAEP[4], 2007) avec plus de 70 % d'entre elles qui disposent de moins de 1,5 ha et celles de plus de 4 ha ne représentent que 4,8 % (INSTAT, 2011). Avec environ 75 % de la production agricole de nature vivrière, l'autoconsommation est la principale destinée des productions agricoles. Cela concerne en particulier le riz pour lequel plus du tiers en moyenne des surfaces cultivées est dédié à cette culture ; mais le manioc, le maïs et la pomme de terre sont aussi des aliments très consommés. Si l'agriculture familiale malgache repose encore majoritairement sur l'autosubsistance via la riziculture, le développement des cultures commerciales dans certaines régions nuance fortement cette dominante mais se trouve confrontée aux mêmes problématiques démographiques et de pression sur les terres arables. En effet, l'agriculture familiale malgache assure près de 90 % de la production locale de vanille, café ou giroflier commercialisée ensuite sur les marchés internationaux (INSTAT, 2011).

Malgré cette diversité de ressources naturelles et culturelles, avec un Indice de développement humain de 0.528 Madagascar se situe aujourd'hui au 164ième rang sur 189 pays (PNUD 2020). Selon les chiffres de la Banque Mondiale de 2020, la population malgache vit en moyenne avec moins de 1,3$ par jour (RNB/habitant= 470 $) et cette pauvreté affecte principalement les zones rurales. Cette situation témoigne de défaillances structurelles importantes et déjà mises au jour dans le passé au travers de nombreuses crises économiques, sociales et politiques qui enfonçaient à chaque fois le pays un peu plus dans la pauvreté (Razafindrakoto et al. 2018). Ces défaillances ont trait notamment aux systèmes de santé et d'éducation, à la gestion des infrastructures publiques et des voies de transport d'humains et de marchandises, à des faiblesses dans les différents secteurs économiques et en particulier dans l'agriculture. Pour ce dernier, même si des actions d'appui et de développement sont entreprises par le gouvernement dans certaines filières d'exportation (celle du giroflier, Penot et Danthu 2019 ; ou celle du litchi, Jahiel et al. 2014), il suffit de constater l'état des routes pour se rendre compte que le développement agricole peine à se faire une place parmi les priorités de l'agenda gouvernemental alors que les enjeux sont considérables.

Plus de 80 % de la population (N= 25 680 342) vit en milieu rural et près de 68 % des foyers malgaches sont considérés comme des ménages agricoles (RGPH-3, INSTAT 2019[5]). La tendance n'est pas à la baisse avec une multiplication par 3,5 de la population rurale entre 1960 et 2015 (RGPH-3, INSTAT 2019). La croissance démographique et le morcellement générationnel de la superficie des terres conduisent à une diminution progressive des terres dont dispose chaque nouveau ménage agricole qui s'installe : il devient alors de plus en plus difficile de trouver des conditions de vie décentes

[4] MAEP (2007). Recensement de l'agriculture. Campagne agricole 2004-2005. Tome I : Généralités, méthodologies et principaux résultats. Ministère de l'agriculture, de l'élevage et de la pêche. Antananarivo : octobre 2007, 81 p. [http://www.fao.org/fileadmin/templates/ess/ess_test_folder/World_Census_Agriculture/Country_info_2000/Reports_1/MAG_ENG_REP_2005_01.pdf]

[5] Rapport préliminaire du recensement – Troisième recensement général de la population et de l'Habitation publié en février 2019 et reposant principalement sur des données de 2018

au travers d'activités agricoles (Burnod et al. 2016). Pourtant c'est le seul secteur qui par le passé a montré la capacité d'absorber la main-d'œuvre représentée par les jeunes actifs. Malgré la mise en valeur de nouvelles terres pour l'agriculture et l'intensification de pratiques dans certaines filières, la situation présage que dans son état actuel l'agriculture familiale aura des difficultés d'une part à satisfaire les besoins en terres d'une population rurale croissante, et d'autre part à assurer une certaine autonomie du pays pour une sécurité alimentaire de base (FAO 2018). Cela se traduit directement dans le rapport entre les exportations et les importations de produits agricoles alimentaires qui ne cesse de se déséquilibrer depuis les années 2000 (RGPH-3, INSTAT 2019).

Quel que soit le type de culture et sa destinée, la conquête de terres agricoles est un enjeu crucial de l'agriculture familiale ; or elle se trouve confrontée à des terres dégradées (érosion, baisse de la fertilité) et aux enjeux de préservation des forêts qui ciblent la réduction du *tavy* (Aubert et al. 2003, Messerli 2003), l'une des principales causes de la déforestation (Vieilledent et al. 2018). Du fait de l'insularité et de la position géographique de Madagascar, la population et l'agriculture nationales sont très vulnérables aux changements climatiques (Tadross et al. 2008, FAO 2018). En plus de cet enjeu de résilience climatique, le poids important des cultures commerciales (par exemple le giroflier, le vanillier et le litchi) dans l'économie du pays (Gouzien et al. 2016) soulève aussi des enjeux de résilience face aux aléas économiques (Danthu et al. 2014). Néanmoins, les différentes régions de Madagascar ne connaissent pas les mêmes dynamiques agraires et ne sont donc pas en proie aux mêmes enjeux de résilience, notamment en raison des conditions pédoclimatiques qu'elles offrent pour l'agriculture.

### ♦La côte Est, des régions fertiles pour les cultures commerciales

La côte est de Madagascar présente un climat tropical humide : la moyenne des températures fluctue selon les mois entre 17°C et 35°C et celle des précipitations mensuelles entre 100 mm et 500 mm. L'année est marquée par trois périodes : une saison hivernale humide et fraîche de juin à août-septembre, une saison estivale chaude le reste de l'année avec la période des cyclones plus pluvieuse de décembre à mars-avril. Ces conditions sont favorables à la culture d'une grande diversité d'espèces, même si des cyclones touchent fortement et régulièrement la côte (les majeurs : Honorine en 1986, Bonita en 1996 et Ivan en 2008), causant des ravages dans les cultures (Donque 1975, FAO 2018). En raison de ces caractéristiques climatiques et agroécologiques, les régions côtières ont été identifiées par les colons européens comme une zone privilégiée pour mener à bien une "*colonisation agricole*" avec diverses cultures commerciales exotiques, et en particulier le caféier et le giroflier (Galliéni 1908, François et Ledreux 1929, Isnard 1951, Cocoual et Danthu 2018).

> *"Longtemps la bande côtière de l'est [de Madagascar] a paru la région de colonisation par excellence" (Isnard 1951)*

Avant l'arrivée de ces cultures, les paysan.ne.s betsimisarakas, l'ethnie majoritaire sur cette côte, vivaient d'une agriculture de subsistance reposant principalement sur la pratique du *tavy* pour la

production de riz. La culture d'autres espèces vivrières, telles que des légumes feuilles, des tubercules, des légumineuses (Figure 2-2), l'élevage (zébus, poulets, porcs), les produits de la cueillette et de la chasse dans les forêts ainsi que ceux de la pêche dans les rivières, avaient aussi une place importante dans l'alimentation, dans les coutumes betsimisarakas et dans les conditions de vie matérielles des familles rurales (Figure 2-2). Cette agriculture s'est progressivement transformée, marquée par l'introduction de nouvelles cultures au cours des différentes périodes d'occupation de Madagascar, mais aussi par la croissance démographique et par l'ouverture du pays à l'économie de marché.

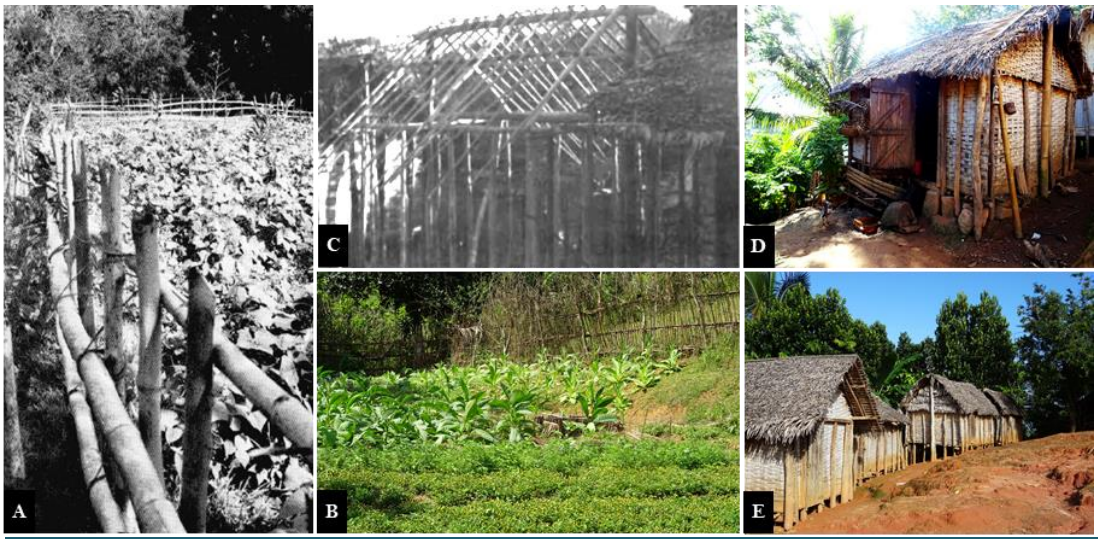



*Figure 2-2: (A) Parc à bœufs converti en champs de voantsiroko (*Senna occidentalis*), cliché pris par M. Petit, légende et photographie extraites de (Dandoy 1973). (B) Petit jardin d'espèces vivrières, avec au premier plan des brèdes* Solanum nigrum *et au deuxième plan des plants de tabac* Nicotiana tabacum *(©J. Mariel). (C) Case en construction, légende et photographie extraites de (Dandoy 1973). (D) et (E) des habitations traditionnelles Betsimisaraka dont le toit est fabriqué en feuilles de palmier* Ravenala madagascarensis, *les murs en bambou et la charpente en bois de différentes essences (e.g* Eucalyptus *sp.*, Grevillea *sp.) (©J. Mariel).*

Dès le début du XX$^{ième}$ siècle, les régions de la partie Nord, en particulier l'actuelle région Analanjirofo, devinrent des bassins de production de café (François et Ledreux 1929), puis plus tard celui des produits issus du giroflier (Danthu et al. 2014) dont la production se concentrait initialement surtout sur l'île de Sainte-Marie située au nord-est de l'île (Ledreux 1928). De nombreuses autres cultures ont été introduites (vanillier, poivrier, cannellier, cacaoyer par exemple) ou intensifiées (par exemple la canne à sucre, Isnard 1951) mais leur développement n'a pas été aussi significatif que celui du giroflier ou du caféier qui ont bénéficié d'un appui et d'un accompagnement importants de la part de l'administration coloniale française (Blanc-Pamard et Ruf 1992, Cocoual et Danthu 2018). L'intégration de ces espèces dans l'agriculture des Betsimisarakas s'est faite de manière graduelle et hybride (Figure 2-3, B.2), sous l'influence des pratiques promues par les colons (girofliers en monoculture, caféiers sous ombrage, cf. Figure 2-3.A.1), des crises économiques (par exemple la crise du café dans les années 1980) et des contraintes du milieu (Danthu et al. 2022). Ainsi sur la côte nord-est, les paysages agricoles témoignent de cette diversité de pratiques et d'une inégale adoption de ces

cultures par les paysan.ne.s, même si le milieu physique et l'organisation des villages conditionnaient leur intégration dans l'espace agricole (Figure 2-3, A2 et B2, Dandoy 1973, Blanc-Pamard et Ruf 1992).

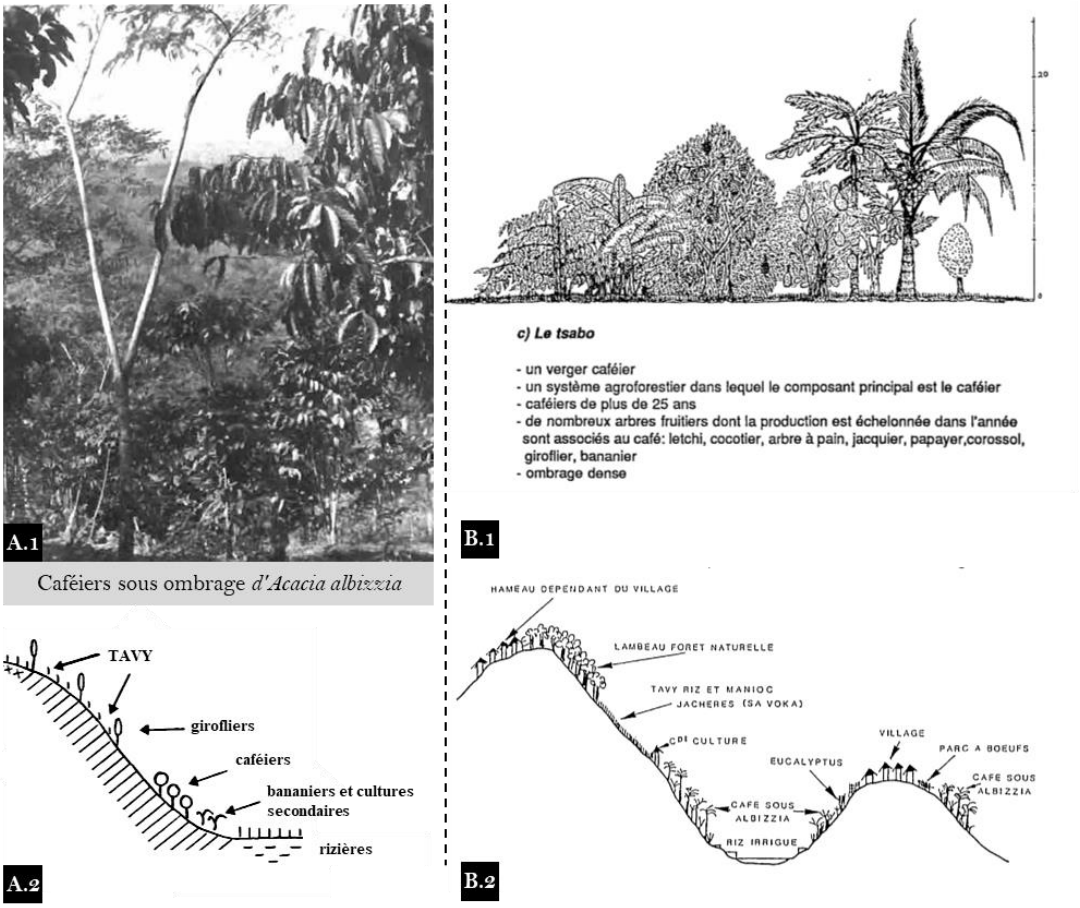



*Figure 2-3: L'intégration du giroflier et du caféier dans les parcelles et dans les paysages agricoles de la côte nord-est. (A) Photographie et dessins extraits de Dandoy (1973). (B) Dessins extraits de Blanc-Pamard et Ruf (1992).*

Même si les paysan.ne.s de la côte est donnaient la priorité à la production de riz, la croissance démographique a progressivement rééquilibré l'importance relative de la riziculture et du *tavy* par rapport à celle des cultures commerciales. Dans un paysage agricole de plus en plus saturé, cultiver des espèces pérennes à valeur marchande devenait un moyen d'être propriétaire de terres et de constituer un capital "sur pied" à transmettre à la descendance. Celles-ci fournissaient également les revenus nécessaires pour acheter la part de riz que les parcelles de rizière et de *tavy* ne pouvaient plus produire en raison, d'une part, d'une baisse de la productivité liée à celle de la fertilité des sols, et d'autre part, d'une réduction des surfaces disponibles pour chaque famille résultant du morcellement générationnel des terres (Petit 1965, Blanc-Pamard et Ruf 1992). En devenant un moyen de diversifier les moyens d'existence et d'améliorer les conditions de vie l'achat de biens de consommation, les cultures commerciales ont profondément changé les stratégies paysannes. Ces changements soulèvent notamment des enjeux de résilience face aux aléas économiques, et par conséquent ils posent la question des modes de production de ces cultures.

En effet, la chute des prix du café dans les années 1990 n'a pas été sans conséquence sur l'économie des ménages agricoles ayant favorisé la production de caféiers au détriment d'autres cultures vivrières (Blanc-Pamard et Ruf 1992). Aujourd'hui, le risque existe aussi pour les producteurs et productrices de girofliers (Danthu et al. 2014) et de vanilliers (Hänke et al. 2018, Llopis et al. 2020), les deux cultures qui ont supplanté le caféier depuis la crise des années 1980. Dans le cas du giroflier par exemple, les revenus générés par la vente des clous et de l'huile essentielle (extraite des feuilles par distillation, Figure 2-4) font partie intégrante du fonctionnement socio-économique des ménages (Droy et al. 2017, Mariel et al. 2021b). Néanmoins, ce risque économique peut être atténué avec des stratégies paysannes reposant sur la diversification des espèces à l'échelle des exploitations agricoles : les produits issus de cette diversification conduite dans des agroforêts contribuent à la fois à la sécurité alimentaire des ménages et aussi à la stabilité de leurs revenus (Mariel et al. 2021b).




*Figure 2-4: (A)(B) Fagots de bois morts et de feuilles sèches de palmiers prêts à être amenés à l'alambic. (C) Séchage sous abris des feuilles de giroflier dans des moustiquaires converties. (D) Emplacement d'un alambic, avec son abri, du bois de chauffe et des sacs remplis de feuilles sèches de giroflier. (E) Acheminement de l'eau depuis la source vers l'alambic grâce à des "canalisations" en bambou. (F) Séparation de l'huile essentielle et de l'eau en sortie de l'alambic. (G) Alambic et son foyer. (H) Rassemblement de villageois et de villageoises autour de l'alambic. (toutes les photographies ©J. Mariel)*

Au-delà des aspects de résilience économique liée aux cultures commerciales, les paysan.ne.s de la côte nord-est sont aussi confrontés à des problématiques de gestion durable des ressources naturelles. Dans les zones où le couvert forestier est encore très présent, une tension forte existe entre l'expansion de l'agriculture, le besoin en bois de la population et la préservation des forêts (Gezon et Freed 1999, Kull 2000) ; alors que dans le cas des zones marquées par la déforestation les enjeux se

trouvent davantage dans la restauration des sols et de la biodiversité (Styger et al. 2007, Martin et al. 2009, 2012). Face à ces problématiques, des solutions peuvent émerger des dynamiques de diversification agroforestière observées dans les agroforêts à giroflier (Arimalala et al. 2019, Michel et al. 2021, Mariel et al. 2021b) et à vanilliers (Llopis et al. 2020, Martin et al. 2020).

### ♦Le village d'étude : Vohibary dans la zone de Vavatenina

Une étude de référence : la monographie réalisée par Dandoy en 1966 sur la zone de Vavatenina

Dans la région Analanjirofo, la zone de Vavatenina, située dans le district éponyme, offre des paysages agricoles pertinents pour appréhender les enjeux de résilience dans le cas de dynamiques agroforestières portées par les paysan.ne.s sur des terres défrichées par le *tavy* et marquées par les cultures du caféier et du giroflier. En effet, la monographie de Gérard Dandoy réalisée en 1966 donne accès à des connaissances précises sur le contexte socio-économique, biophysique et culturel à l'échelle d'un village (Vohibary) et d'une zone d'un rayon d'environ 25 km autour de la ville de Vavatenina ; ces connaissances servent ainsi de références pour mettre en évidence les dynamiques agroforestières, pour mieux comprendre les interactions et les processus à l'origine de ces dynamiques, et aussi pour discuter des enjeux de résilience au regard des évènements passés.

Autour de la zone de Vohibary, Dandoy a exploré 11 villages sélectionnés à partir de leur contexte agroécologique et de leur proximité avec les axes routiers et la ville de Vavatenina. Ses travaux ont révélé des dynamiques agricoles locales qui lui ont permis de distinguer plusieurs zones agroécologiques. Ces dernières partageaient toutes un problème d'autosubsistance qui se traduisait par des périodes de soudure[6] (allant de 1 à 5 mois) et par la généralisation des plantations de caféiers (327 en moyenne par famille) avec dans une moindre mesure celles de girofliers (75 en moyenne par famille) qui fournissaient l'essentiel des revenus. De manière globale, Dandoy soulignait l'enjeu d'une production vivrière insuffisante et de trop faibles revenus pour compléter le manque. En comparant les villages, il a mis en évidence un regroupement de ces derniers correspondant aux trois paysages qu'il avait identifiés dans la zone le long d'un gradient est-ouest : (i) à l'Est, la plaine d'Iazafo proche de la côte présentait une agriculture très tournée vers la riziculture irriguée, (ii) plus vers l'Ouest, les basses collines montraient une agriculture davantage axée sur le café et sur le giroflier, et (iii) à l'Ouest, les marges forestières correspondant aux plus hautes collines encore boisées révélaient une pratique du *tavy* encore significative.

Dans sa description de la "*vie régionale*" de Vavatenina, Dandoy soulignait le rôle central du commerce et de l'administration ayant favorisé le développement des cultures commerciales y compris dans les villages isolés des marges forestières. La ville de Vavatenina était devenue une "*petite capitale régionale*" au niveau de laquelle convergeaient tous les axes de circulation permettant la

[6] C'est une période durant laquelle les stocks de riz sont bas, obligeant les ménages à se rationner juste avant les nouvelles récoltes ou à des moments de l'année de fortes dépenses (les revenus du ménage vont dont au paiement de ces dépenses et non à l'achet de riz).

commercialisation des productions agricoles : sur le marché de la ville pour les produits vivriers, auprès de commerçants chinois ou malgaches principalement pour le café, pour les clous et pour l'huile essentielle de giroflier, pour le poivre. Ces commerçants basés dans la cité contrôlaient notamment la collecte des productions en travaillant avec des intermédiaires d'autres communes (cantons à l'époque) et faisant le lien avec les paysan.ne.s. Dandoy décrivait que le café représentait près de 86 % de la valeur totale générée par l'ensemble des productions agricoles, contre 13 % dans le cas des produits du giroflier (clous et huile). Outre ces produits, il notait que le vanillier, *"culture en voie d'abandon"*, avait un poids marginal contrairement au poivre. Cependant, il pointait du doigt un *"encadrement agricole inefficace"* et un état désastreux de la route RN22 (reliant Vavatenina à l'axe routier national Fenerive-Tamatave) limitant ainsi la commercialisation de produits agricoles fragiles et périssables (notamment les fruits), contraignant le portage à dos d'humain des productions, et impactant fortement la rémunération des paysan.ne.s (plus leur village était difficile d'accès, moins iels étaient payé.e.s). Dandoy concluait en écrivant que *"tous les villages, mêmes les plus isolées, participent à l'économie d'échange"* et que *"la croissance démographique [...] met l'ensemble des communautés villageoises dans l'obligation d'évoluer"*. Il proposait ainsi deux grandes trajectoires possibles : l'augmentation des productions vivrières ou celle des productions d'exportation, avec un bémol sur ces dernières compte tenu de la perception des risques économiques liés à ces cultures.

Aujourd'hui, il est constaté une évolution dans les paysages, mais selon des trajectoires qui témoignent plus de processus de diversification que d'une spécialisation sur des cultures vivrières et/ou des cultures commerciales. **Mon travail de recherche propose donc une description et une compréhension plus fine de ces dynamiques via une étude des paysages de Vavatenina, et de manière plus approfondie du village de Vohibary.**

Vohibary : le village et ses paysan.ne.s betsimisarakas

Parmi les sept communes de la zone d'étude, Vohibary se trouve dans la commune de Vavatenina, à environ 5 km de la ville de Vavatenina et à une cinquantaine de kilomètres de la côte océanique (Figure 2-6). Le village ne présente pas un fort niveau d'enclavement, mais la route pour s'y rendre n'est que partiellement goudronnée et en mauvais état, avec une portion de piste majoritaire depuis Vavatenina difficilement praticable même par un véhicule tout-terrain. Le paysage de Vohibary est façonné par des collines (appelées localement *tanety*, Figure 2-5) et son réseau hydrographique se structure autour de la rivière principale Sahameloka qui irrigue les bas-fonds rizicoles. Cette rivière est alimentée continuellement par les nombreux ruisseaux prenant source sur les *tanety* et de manière temporaire lors de la saison pluvieuse. Les caractéristiques pédologiques des sols sont fortement corrélées à la topographie : un sol ferralitique témoignant de l'érosion occupe principalement le sommet des *tanety* et les colluvions de pente au niveau des versants forment un sol argilo-sableux sur lequel repose un horizon humifère (Dandoy 1973). Le bas des versants et les bas-fonds présentent un sol hydromorphe, nourri des apports ferralitiques et humifères des eaux de ruissellement (Dandoy 1973).

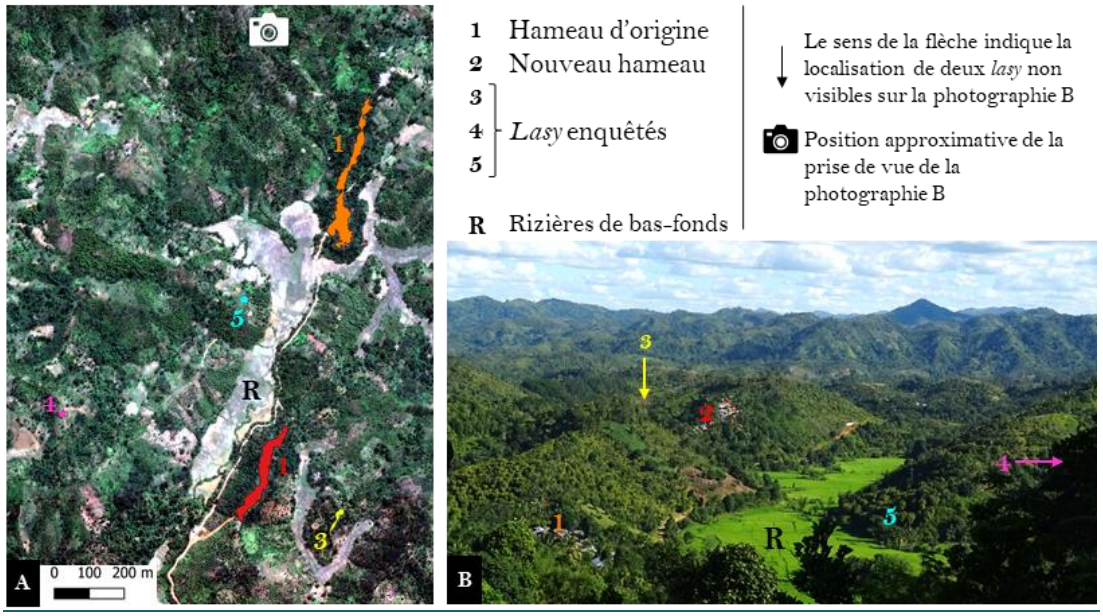



*Figure 2-5: (A) Vue aérienne des deux hameaux de Vohibary et des* lasy *enquêtés. (B) Photographie du village dans son paysage de* tanety. *A : image satellite Pléiade acquise en 2018 (cf. chapitre 4). B : ©J.Mariel.*

Appartenant majoritairement à l'ethnie Betsimisaraka, les 130 ménages environ[7] de Vohibary se répartissent dans deux hameaux : le hameau originel décrit par Dandoy et un nouveau situé sur la *tanety* d'en face et construit avec l'augmentation de la population (Figure 2-5). Certaines habitations isolées ou en groupe de deux ou de trois (appelées *lasy*) parsèment les *tanety* et deviendront peut-être les futurs hameaux du village. Un *lasy* représente un ménage ou plusieurs membres de la même famille. Outre la raison du manque de place dans le village, décider de s'installer dans un *lasy* est souvent lié à un choix d'établir un petit élevage de volailles qui nécessite de l'espace pour que les bêtes puissent vivre en liberté sans déranger les villageois et sans risquer d'être volées. Une autre raison est celle de vouloir se rapprocher des parcelles cultivées lorsque celles-ci sont éloignées. Le village possède une école dans laquelle les enfants sont incités à venir jusqu'à leurs dix ans, et une église protestante (FJKM), symbole de la croyance dominante dans le village.

Les ménages de Vohibary se répartissent sur quatre principaux segments de lignage[8] dont les tombeaux respectifs se situent à différents endroits sur les *tanety* environnants. Les coutumes betsimisarakas conditionnent sensiblement la vie quotidienne et les relations sociales, bien que certaines d'entre elles semblent être moins respectées, comme par exemple les interdits (*fady*) et l'autorité des anciens (Dandoy, 1973 ; obs. pers). Aujourd'hui, le fonctionnement du village mêle des règles coutumières, que le *tangalamena*[9] se charge de faire respecter, et des règles émanant de la loi malgache dont le chef du village doit veiller à l'application. Les relations familiales restent très

[7] Chiffre approximatif faute de document de recensement récent et évalué à partir des dires du Chef du village et d'un comptage des maisons au sol et à partir d'une photo aérienne.
[8] Un lignage correspond à un groupe de descendants sur quatre générations en général
[9] Traditionnellement, les *tangalamena*, responsables de la communication entre les ancêtres et les vivants, sont responsables du partage des terres et de la résolution des conflits internes (Linot et al. 2019).

structurantes dans la vie des Betsimisarakas et la transmission générationnelle des biens, matériels et immatériels, préfigure en partie l'évolution sociale des individus. Au moment de l'héritage, les terres parentales sont distribuées de manière équitable entre tous les enfants, quel que soit leur sexe. Le système matrimonial repose principalement sur l'exogamie et sur la patrilocalité, à savoir l'installation de la femme dans le village d'origine du mari. Bien qu'elles quittent leur village, les épouses gardent le droit d'usage des terres héritées de leurs parents. Ces terres sont donc a priori des ressources pour le nouveau ménage, sauf si leur éloignement par rapport au village du mari rend difficile leur exploitation. Les affiliations de sang et matrimoniale reposent sur des liens forts de solidarité, de confiance, d'amour et de réciprocité (termes repris des discussions avec les villageois.es). Ces relations inter-individuelles fortes existent aussi hors du cadre familial et la population malgache emploie le terme spécifique de *fihavanana* pour les qualifier. Cependant, le *fihavanana* ne se limite pas à une forme de relation sociale et s'exprime plus largement dans la manière de vivre des individus et de la communauté villageoise (Gannon et Sandron 2006).

La vie quotidienne des paysan.ne.s est rythmée par les activités agricoles, mais les dimanches (jour de messe et de match de football) et les jours *fady*[10] personne ne travaille. Des évènements nationaux religieux et relevant de l'histoire de Madagascar ponctuent l'année : Noël, la Nouvelle Année, la Journée de la femme, Pâques et la fête de l'Indépendance (26 juin). Ces évènements sont de nature festive et sont des occasions pour les familles de "se faire plaisir" autour d'un repas carné (à base notamment de zébu, de cochon ou d'oie) ou en s'achetant un bien qui sort de l'ordinaire. Ces moments sont très attendus par les villageois.es qui commencent à économiser un peu d'argent plusieurs mois avant afin de profiter pleinement des réjouissances. En plus de ces rendez-vous ont lieu, à des fréquences variées, des cérémonies traditionnelles pour célébrer un mariage, pour rendre hommage à une personne décédée ou pour commémorer les anciens reposant dans les tombeaux de chaque lignage de famille (cérémonie appelée localement *tsabohara*).

## 3. PRESENTATION DES PARTIES : CHAPITRES ET CADRES CONCEPTUEL ET METHODOLOGIQUE

Mon mémoire se compose de trois parties et d'un ensemble de cinq chapitres correspondant à des articles soumis (chapitres 3 et 6) ou publiés (chapitre 4) et en cours de soumission (chapitres 4 et 7) (Figure 2-6).

[10] C'est-à-dire les jours où certains actes, usages et contacts sociaux ont été établis comme interdits par la population locale selon des critères émanant des croyances traditionnelles qui définissent la distinction entre ce qui est permis et ce qui n'est pas permis (Razafimpahanana 1970).

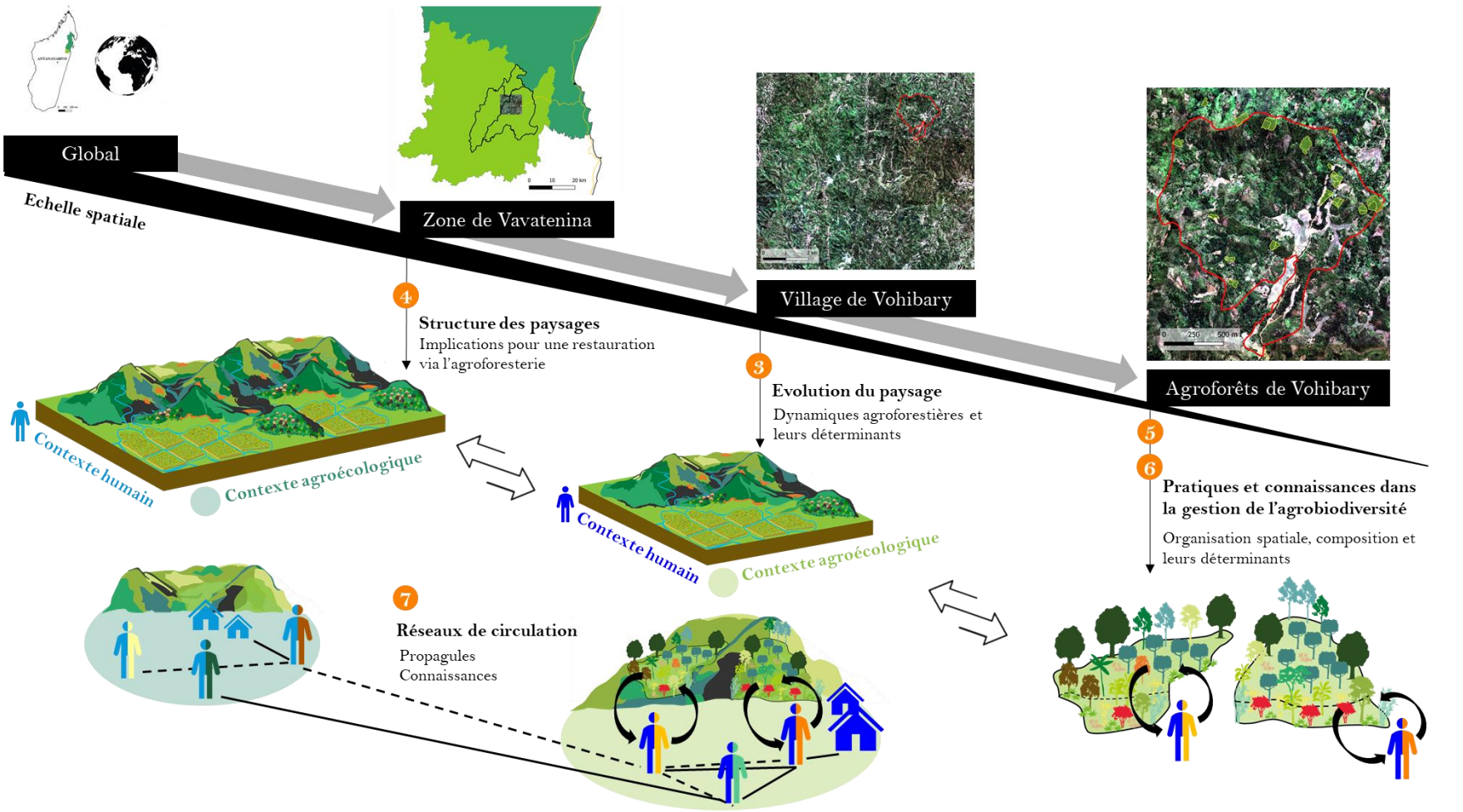



*Figure 2-6: Schéma conceptuel général de mon travail de recherche (graphismes ©C.Mariel).*

### ♦Partie I : L'analyse spatiale et l'écologie du paysage pour caractériser les dynamiques agroforestières et leur potentiel de restauration

La Partie I se consacre à l'échelle du paysage : celle du village d'étude et celle de la zone de Vavatenina (environ 84 km²). À partir d'un travail d'analyse d'images aériennes (satellitaires, photographiques), les modes d'occupation du sol de ces paysages ont été cartographiés afin de (i) caractériser les dynamiques agroforestières, les facteurs socio-économiques à l'origine de l'émergence d'agroforêts (chapitre 3) et les facteurs physiques influençant leur répartition spatiale (chapitre 4), et enfin (ii) de discuter le potentiel de l'agroforesterie pour restaurer la zone de Vavatenina (chapitre 4).

Via une description diachronique des modes d'occupation du sol de Vohibary (1966-2016), le **chapitre 3** s'intéresse à la dimension temporelle des dynamiques agroforestières. Grâce à l'analyse de la littérature historique, je discute des facteurs politiques et socio-économiques qui, en influençant les stratégies paysannes, ont été les moteurs de ces dynamiques agraires. Ce travail offre un premier aperçu de l'agrobiodiversité cultivée et des pratiques de gestion associées, en particulier celles témoignant d'une gestion en agroforesterie, et une compréhension plus fine des conditions initiales de la diversification.

En s'inscrivant davantage dans le domaine de l'écologie du paysage, le **chapitre 4** vise premièrement à caractériser l'étendue de l'agroforesterie dans la zone de Vavatenina et sa répartition spatiale par rapport à la topographie du paysage. Deuxièmement, ce chapitre discute du potentiel de restauration de l'agroforesterie et des modalités de cette restauration en se basant sur l'analyse de la structure du paysage et de son hétérogénéité. Cette analyse repose sur une carte produite par télédétection pour caractériser les différents modes d'occupation du sol. Cette méthode requiert des connaissances et des compétences spécifiques ; l'analyse fut donc entreprise par Camille Lelong (UMR Tétis) et par Hasina Herimandimby (Consultant malgache en télédétection). L'identification des modalités d'une restauration via l'agroforesterie s'appuie sur des concepts relevant de l'écologie du paysage et en particulier sur celui d'hétérogénéité paysagère (Turner et Gardner 2015). Ce concept prend en compte à la fois la composition (diversité des occupations du sol, Figure 2-7) et leur configuration (arrangement spatial des occupations du sol, Figure 2-7 ; Fahrig et Nuttle 2005). Il permet d'identifier des sous-unités paysagères homogènes dans leur structure et de mettre en évidence les caractéristiques de cette structure qui contribuent à fournir des éléments de réflexion sur des modalités de restauration.

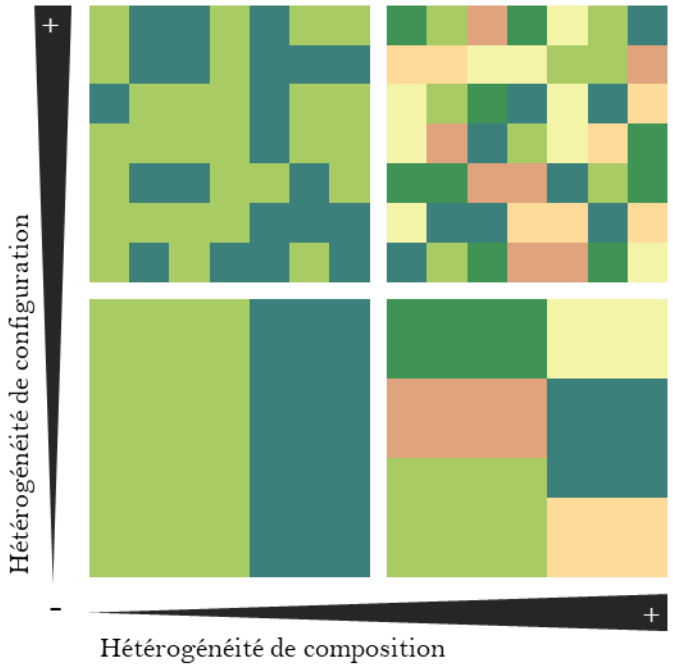



*Figure 2-7 : Illustration schématique de l'hétérogénéité de composition et de configuration, en considérant comme unité de base la forme carrée d'un pixel (figure inspirée de Fahrig et al. 2011).*

### ♦Partie II : l'ethnoécologie pour étudier les connaissances locales des paysan.ne.s

**La Partie II** s'intéresse à la gestion locale de l'agrobiodiversité à l'origine des dynamiques agroforestières observées en analysant les pratiques et les connaissances paysannes sur les cultures et leurs interactions avec le milieu. Elle cherche à mieux comprendre comment l'agrobiodiversité et sa gestion constituent des moyens pour s'adapter à l'hétérogénéité du milieu et aux changements.

Cette étude des connaissances paysannes s'inscrit dans le champ disciplinaire de l'ethnoécologie (Hunn 2007, Anderson et al. 2012) qui propose un cadre conceptuel et méthodologique pour analyser *"comment au sein de groupes sociaux les gens conçoivent et pensent les objets et les événements qui composent leur monde"* (D'Andrade 1995) et pour identifier les *"traits mentaux distinctifs qui rendent compte de la cognition humaine du monde et dirigeant l'activité sociale"* (Atran 1991). La culture, qui caractérise une population et ses individus, est ainsi appréhendée comme un *" code "* et l'ethnoécologie cherche à décrypter ce *"code"* via l'étude de leur *"vue du monde "* et la compréhension de ce qui construit cette *"vue du monde"* et de ce qui est à l'origine de différences entre individus et entre groupes d'individus (Frake et Conklin 1962, Taylor 1984, Atran 1991). Ainsi, pour un domaine de connaissances (théoriques et empiriques, Figure 1-4) et pour une population locale donnés, une telle approche permet notamment de distinguer les connaissances les plus significatives (c'est-à-dire les plus partagées) de celles les plus rares. Par ailleurs, cette approche permet de mettre en évidence des traits culturels pouvant expliquer cet "état" du domaine de connaissances et l'existence de ressemblances et de dissemblances entre paysan.ne.s selon les connaissances qu'iels détiennent.

Cette recherche considère que les paysan.ne.s ont chacun.e leur propre manière de concevoir le monde, de par leurs expériences individuelles et collectives. Elle suppose aussi que leur appartenance à un groupe construit une unité culturelle qui s'exprime au travers de connaissances partagées. Partant de ces principes, j'ai mobilisé des approches et des méthodes développées en ethnoécologie (Reyes-García et al. 2007, Albuquerque et al. 2014), articulant des approches descriptives et quantitatives, pour étudier les connaissances paysannes empiriques et théoriques portant sur l'agrobiodiversité et sur ses relations avec le milieu. Pour simplifier la lecture du manuscrit, j'emploierai dès à présent le terme "connaissance" pour désigner la forme théorique et "pratique" pour la forme empirique (Reyes-García et al. 2007). Les paragraphes suivants décrivent la méthodologie générale, les méthodes précises et leurs objectifs sont explicités en détail au sein des différents chapitres.

Le **chapitre 5** offre une étude approfondie des pratiques d'association et d'organisation spatiale des espèces végétales dans les agroforêts à girofliers. Ce travail explore d'une part le domaine des connaissances locales relatives à l'agrobiodiversité et à ses interactions avec le milieu ; d'autre part, il vise à préciser notre compréhension de la manière dont les paysan.ne.s voient et expliquent ces relations qui sous-tendent la composition et la structure de leurs agroforêts. Avec ce travail, je cherche à mettre en évidence comment iels mobilisent l'agrobiodiversité pour composer avec leurs besoins d'un côté, les contraintes et les ressources du milieu biophysique de l'autre, pour tenter de s'adapter aux aléas et aux changements. L'étude des pratiques a combiné une méthode de cartographie participative inspirée de celle développée par (Figure 2-8.C, Méndez et al. 2001) et des entretiens semi-structurés[11] permettant de comprendre les logiques d'organisation spatiale des cultures selon l'hétérogénéité du milieu, dans l'espace et dans le temps. Par ailleurs, la réalisation de *focus* groupes a permis de documenter la classification des usages associés à l'agrobiodiversité en utilisant la méthode du *pile-sorting*[12] (Albuquerque et al. 2014).

[11] Un entretien semi-structuré repose sur un ensemble de questions ouvertes (c'est-à-dire les réponses ne sont pas prédéfinies par l'enquêteur) dont leur déroulement au court de l'entretien est en partie guidé par l'enquêteur de manière à ce que toutes les questions soient abordées et que les réponses soient les plus claires et précises possibles.

[12] Le *pile-sorting* consiste à demander à la personne enquêtée de regrouper des items représentés sur des cartes, ici les espèces végétales composant l'agrobiodiversité locale, selon le partage de caractéristiques communes relatives à la connaissance étudiée.




*Figure 2-8: (A) Méthode de* pile-sorting *pour explorer en focus groupe les différents types de sol et l'adaptation des espèces (représentées sur les cartes) à ces différents types de sol. (B) Focus groupe pour recueillir le niveau de consensus des paysan.ne.s concernant les changements observés dans leur environnement (protocole LICCI, Reyes-García et al. 2021). (C) Méthode de carte participative pour étudier la composition et l'organisation spatiale des espèces dans une agroforêt selon la topographie.*

En mobilisant le cadre de l'ethno-pédologie et une approche dynamique des connaissances paysannes, le **chapitre 4** analyse plus spécifiquement le sol et les interactions mutuelles sol-agrobiodiversité. Ce travail vise à apporter un éclairage sur la manière dont les paysan.ne.s composent avec l'hétérogénéité des sols e leurs agroforêts. En mettant en perspective mes données sur les connaissances et les pratiques avec celles du passé, je tente de mettre en évidence le caractère évolutif et adaptatif des connaissances, et donc des pratiques qui en découlent, pour mieux comprendre les dynamiques agroforestières. Cette étude a reposé sur des *focus* groupes conduits pour décrire la classification locale des sols (Figure 2-8.A), et pour documenter les changements qu'iels observaient dans leur environnement (Figure 2-8.B). Par ailleurs, l'approche du consensus culturel[13] a été utilisée pour analyser la distribution des connaissances sur les interactions mutuelles sol-agrobiodiversité et pour mettre en évidence l'existence ou pas de visions partagées. Enfin, des entretiens ont permis de documenter les changements de pratiques agricoles induits par un changement affectant le sol.

### ♦Partie III : les réseaux relationnels pour étudier les modes d'accès des paysan.ne.s aux propagules et aux connaissances

**La Partie III** se compose du **chapitre 7** qui porte sur l'accès des paysan.ne.s de Vohibary aux propagules et aux connaissances relatives à trois espèces agroforestières (bananier, giroflier, vanillier). Ce chapitre vise à mieux comprendre comment les caractéristiques socio-culturelles régissent cet accès et la circulation de ressources et d'informations clés pour la gestion de l'agrobiodiversité. En portant une plus grande attention à leur origine géographique, ce travail discute du rôle des connaissances et des propagules exogènes dans les dynamiques agroforestières et à la résilience des systèmes agricoles

[13] L'approche du consensus culturel repose sur l'idée qu'une connaissance partagée par le plus grand nombre d'individus au sein d'un groupe (par exemple communauté) est une connaissance culturellement partagée et qui fait référence au sein du groupe (Boster 1985, Romney et al. 1986)

locaux. Tout ce travail repose sur le cadre théorique et sur le formalisme des réseaux relationnels multi-acteurs (Labeyrie et al. 2019).

L'étude des réseaux relationnels s'inscrit dans une perspective (i) de représentation de la diversité et de la complexité des interactions entre des sociétés (systèmes sociaux) et leur environnement (système écologique), (i) d'analyse des processus régissant ces interactions et donc (iii) de compréhension du fonctionnement des systèmes socio-écologiques (c'est-à-dire couplage des interactions sociales et écologiques, Bodin et Tengö 2012). Cette approche est reconnue pour mettre en évidence des modes de gestion durables des ressources naturelles (Bodin et al. 2006, Bodin et Crona 2009), pour appréhender la résilience des systèmes socio-écologiques (Janssen et al. 2006), en particulier de sociétés rurales (Rockenbauch et Sakdapolrak 2017), et plus précisément pour étudier la gestion de l'agrobiodiversité (Labeyrie et al. 2021a).

Étudier les réseaux relationnels implique d'employer un formalisme particulier et des méthodes d'analyses relevant de la théorie des graphes (Janssen et al. 2006, Lusher et al. 2013, Labeyrie et al. 2019). Un réseau se compose d'entités sociales et/ou écologiques (nœuds) connectées par des liens résultant d'une interaction entre ces entités (Figure 2-9). Lorsque cette connexion résulte de l'échange d'un objet, il y a circulation de cet objet entre les deux entités : le lien qui les connecte peut être dirigé selon le sens dans lequel se fait l'échange ou il peut être pondéré selon le nombre d'échanges ou la quantité d'objets échangés. Les entités et les liens peuvent être décrits par diverses caractéristiques (attributs). L'analyse d'un réseau (SNA : *Social Network Analysis*) vise à décrire sa structure (Figure 2-9), en mettant notamment en évidence des motifs structuraux, et à analyser les processus socio-culturels à l'origine de cette structure en mettant en relation ses propriétés structurales (par exemple les motifs structuraux) avec les attributs des nœuds et des liens (processus exogènes) ou avec la position des nœuds dans le réseau (processus endogènes) (Lusher et al. 2013). Dans le cadre de cette recherche, j'ai étudié les réseaux d'acquisition de propagules et de connaissances des paysan.ne.s de Vohibary. La circulation concerne donc deux objets de nature différente : biologique pour les propagules et immatérielle pour les connaissances. Ces réseaux représentent les paysan.ne.s enquêté.e.s et leurs sources de propagules ou de connaissances qui peuvent être de différentes natures, par exemple selon la nature de l'entité ou du lien sociale. Comme je me suis intéressée à trois espèces différentes, les liens peuvent être pondérés si les paysan.ne.s obtiennent plusieurs fois des connaissances et/ou des propagules auprès de la même source.

Pour analyser ces processus endogènes et exogènes, la SNA permet de calculer des métriques à l'échelle des nœuds et/ou du réseau global. Cette recherche présente un travail qui s'est focalisé sur l'échelle des paysan.ne.s et qui a analysé leur connectivité (processus endogène) en relation avec leurs attributs**.** Cette analyse visait à identifier la présence de paysan.ne.s ayant une place centrale dans la circulation car iels donnent des propagules et/ou transmettent des connaissances plus que les autres dans le village. La mise en relation de cette position dans le réseau avec les attributs des paysan.ne.s permet de mieux comprendre quels sont les processus socio-culturels qui influencent les modes

d'acquisition et de circulation, et de discuter dans quelles mesures ils contribuent aux dynamiques agroforestières.

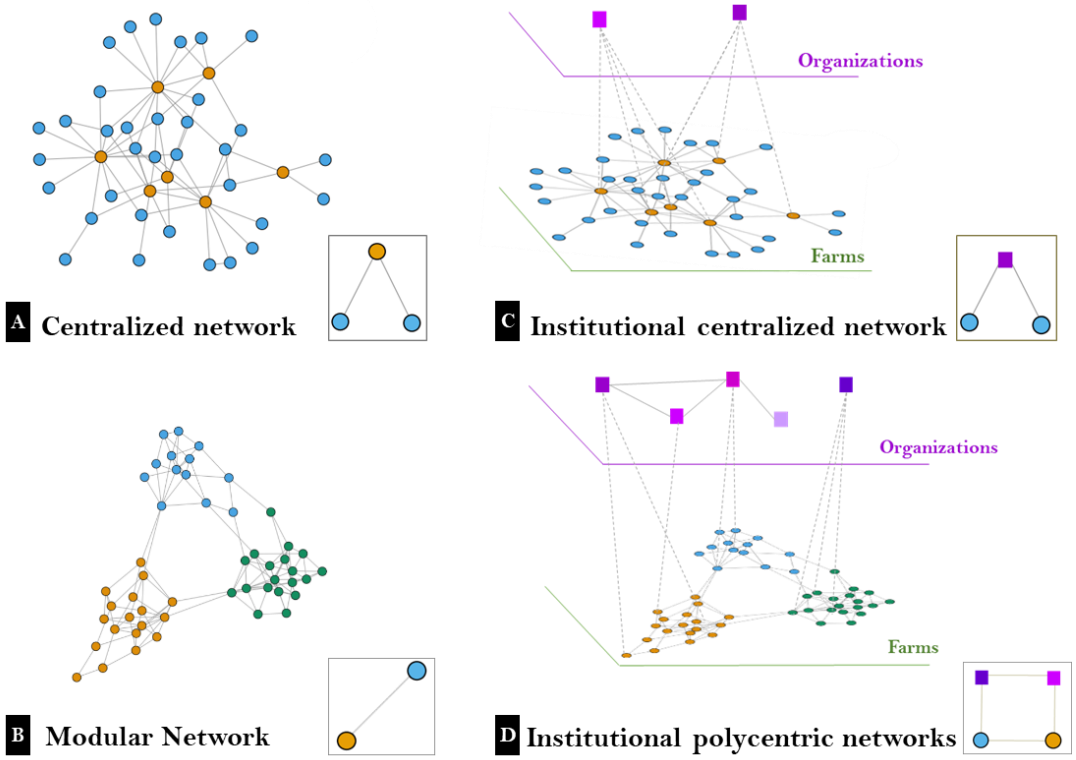



*Figure 2-9: Exemples de différentes structures de réseaux relationnels de paysan.ne.s à l'échelle de leur communauté, avec les nœuds ronds correspondant à des paysan.ne.s et les nœuds carrés à des organisations extérieures à la communauté (figure reprise de Labeyrie et al. 2021a). (A)* ***Réseau centralisé*** *: peu de paysan.ne.s (nœuds oranges) ont un nombre élevé de connexions avec d'autres paysan.ne.s de leur communauté et la majorité estpeu connectes (nœuds bleus). (B)* ***Réseau modulaire*** *: des sous-réseaux (orange, bleu, vert) sont formés par des paysan.ne.s très connectés entre eux en lien avec le partage d'un attribut (par exemple le lieu de résidence, l'appartenance ethnique). (C)* ***Réseau centralisé connecté avec des organisations*** *(par exemple institutionnelle, associative) : le réseau global est très centralisé car peu d'organisations sont connectées avec des paysan.ne.s et inversement. (D)* ***Réseau polycentrique connecté avec des organisations*** *: plusieurs organisations sont connectées avec des paysan.ne.s de sous-réseaux différents qui jouent le rôle de "passeur" entre les organisations et la communauté.*

**Transition :** La partie qui suit présente les deux études de caractérisation des dynamiques agroforestières dans le paysage de Vohibary et dans ceux de la zone de Vavatenina. Selon l'échelle considérée, le travail ne visait pas à répondre aux mêmes questions.

- À l'échelle de Vohibary :
  - Quels sont les changements d'occupation du sol qui ont eu lieu entre 1966 et 2016 ? Et quelle place l'agroforesterie occupe-t-elle dans ces changements ?
  - Quels sont les facteurs socio-économiques et politiques qui ont contribué à ces évolutions et à l'émergence et au développement de l'agroforesterie ?
- À l'échelle de la zone de Vavatenina :
  - Quelle place l'agroforesterie occupe-t-elle dans les paysages par rapport aux autres modes d'occupation des terres ? Son développement est-il homogène sur l'ensemble de la zone ?
  - Comment la topographie influence-t-elle l'intégration de l'agroforesterie dans les paysages et sa répartition spatiale ?
  - L'agroforesterie peut-elle représenter un moyen de restaurer les paysages de la zone de Vavatenina ? Qu'est-ce que cela impliquerait en termes de modalités de restauration ?



# PARTIE I

## Les dynamiques agroforestières dans les paysages



# Chapitre 3 |FROM SHIFTING RICE CULTIVATION (*TAVY*) TO AGROFORESTRY SYSTEMS: A CENTURY OF CHANGING LAND USE ON THE EAST COAST OF MADAGASCAR

Juliette MARIEL[1, 2]

Eric PENOT[3]

Vanesse LABEYRIE[1, 2]

Hasina HERIMANDIMBY[4]

Pascal DANTHU[5]

*Statut : Accepté*
*Revue : Agroforestry Systems*




Photo : L'équipe de MadaMovie en train de mettre en place le drone pour la prise de photographies aériennes du paysage de Vohibary (2016).

[1]*CIRAD, UMR SENS, 34398, Montpellier, France*
[2]*SENS, CIRAD, IRD, Univ. Paul Valery Montpellier 3, Univ Montpellier, Montpellier, France*
[3]*CIRAD, UMR Innovation, 34398 Montpellier, France and Université de Montpellier, CIRAD, INRA, Montpellier SupAgro, Montpellier, France*
[4]*Consultant, Lot VT1Ter VQSG Andohaniato-Ambohipo, Antananarivo 101, Madagascar*
[5]*CIRAD, UPR HortSys, 34398 Montpellier, France and UPR HortSys, Université de Montpellier, CIRAD, Montpellier, France*

## 1. INTRODUCTION

After Indonesia, Madagascar is the second biggest producer and the primary exporter of cloves and clove oil in the world, the world leader on the vanilla market and the fourth world producer of lychees (Altendorf 2018, Chalmin and Jégourel 2019). From an economic point of view, *Sygygium aromaticum*, *Vanilla planifolia*, *Litchi chinensis* produce the three main agricultural products exported from Madagascar (Gouzien et al. 2016). These crops are cultivated in different types of cropping systems and, in particular, in diverse agroforestry systems (AFS) managed by smallholder farmers located on the east coast of Madagascar.

Today, in the Analanjirofo region (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**Figure 3-1), the center of clove production (Danthu et al. 2014) AFS are simultaneous associations of trees, of which the main one is the clove tree, of crops and more rarely of animals. Given the longevity of clove trees, up to 100 years (Maistre 1955), and the duration of their exploitation period, clove trees are cultivated in cropping systems that evolve with the socio-economic context and climatic events (e.g. cyclone). They are either monoculture (5-10 % in our surveys), parklands or complex multi-layered, multi-

species AFS. Parklands are similar to simple AFS with annual food crops (e.g. rainfed rice, cassava, tubers, sugar cane), intercropped with clove trees growing in pastures (60-70 %). Complex AFS (20-35 %) combine large fruit trees (lychee, mango, breadfruit, jackfruit etc.), smaller trees (coffee, citrus), herbaceous plants or lianas (vanilla, pepper) and sometimes include remaining native forest trees (Michels et al. 2010, Arimalala et al. 2019, Michel et al. 2021). The main food crop is rice, produced in paddy fields in all available lowland areas (Le Bourdiec 1974).

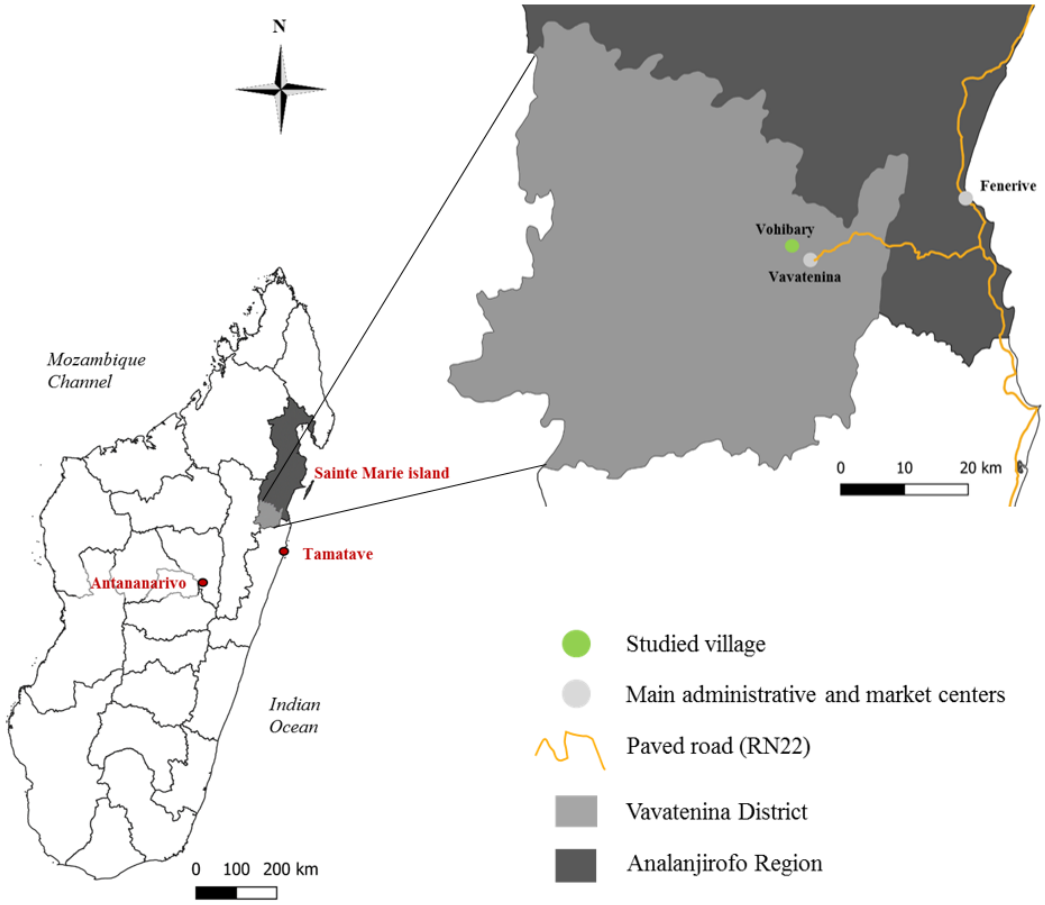



*Figure 3-1: The study area: the village of Vohibary, district of Vavatenina, Region of Analanjirofo, Madagascar*

Studies by Arimalala et al. (2019), Cocoual and Danthu (2018) highlight the fact that the diversity of current production systems derived from the strategies applied by the farmers in the first half of the 20th century. These strategies depended largely on the agricultural policy implemented by the French colonial power that promoted industrial crops for export, grown in large-scale colonial plantations but also cultivated by smallholders (Galliéni 1908). Arimalala et al. (2019) also showed that farmers started growing cloves, but did not apply the cultivation practices recommended by European agricultural technicians (monoculture and low planting density), thereby creating original cropping systems (AFS and high planting density) whose imprints are still visible today. These studies showed that the landscapes and farming systems on the east coast of Madagascar result from

interactions between multiple drivers and from changes that took place over more than a century. This complex history sheds light on the agroecological contexts and farmers' current practices.

We focused on a clearly identified zone, one village and its surrounding landscape, with the aim of updating and analyzing the historical, socio-technical and economic factors that determined changes in the farmers' strategies, production systems, and landscapes. For this purpose, we used as a baseline a monograph by an agronomist (Gérard Dandoy), published in 1973, that described the landscape of Vohibary, a small village in the Vavatenina district in 1966 (Figure 3-1). In particular, the monograph includes a land use map we compared with an updated map drawn 50 years later, based on a set of field surveys conducted in 2016. This diachronic analysis was completed by a corpus of scientific and technical references published over more than a century. First, we compared the diagnoses and maps made in 1966 and 2016 to identify the land use changes in the agricultural landscape of Vohibary. Second, we examined a set of technical and historical documents to explain these changes. Supplementary data were collected in surveys of the farmers, visits to AFS, and the testimonies of village elders.

## 2. MATERIAL AND METHODS

### ♦Study area

The study area focused on the village of Vohibary, located 5 km from Vavatenina, the main town of Vavatenina district, and its agricultural landscape. Vohibary landscape covers an area of 210 ha whose limits are natural ridges or rivers. The natural landscape is shaped by low hills (*tanety*) whose altitude does not exceed 413 m with steep slopes and deep ravines excavated by tropical rainfall. Flat land is limited and lowland rice accounts for a total area of about 13 ha. Cyclones occur regularly (Donque 1975), the last major cyclones were Honorine in March 1986, Bonita in January 1996. Today, the village is composed of two hamlets, Vohibary (the original village) and Antanambo. The population mainly belongs to the Betsimisaraka ethnic group. Table 3-1 lists some characteristics of the village in 1966 reported by Dandoy (published in 1973) and updated in 2016.

*Table 3-1: Some characteristics of the village of Vohibary in 1966 (after Dandoy 1973) and in the 2016 surveys*

| | **1966** | **2016** |
|---|---|---|
| **Population** | One hamlet (Vohibary)<br>186 inhabitants<br>2.76 children/household | Two hamlets (Vohibary and Antanambo)<br>About 120 households in the two hamlets (600 inhabitants)<br>About 3 children/household |
| **Accessibility** | No road, one hour on foot from Vavatenina (5 km) | 2.5 km of paved road (in bad condition) then 2.5 km of track (accessible to off-road vehicles) |
| **Average size of farms** | 5 ha, including 1.6 ha cultivated land | Between 2 and 3 ha/farm, no more available land |
| **Market / marketing methods** | In the village: self-consumption, local sales, barter: vegetable, edible leaves, fruits<br>Sale of fruit, edible leaves, banana, cassava and other products at the Vavatenina market with the goods carried on the back/head; purchase of staple products (rice, salt, sugar, oil, soap, petroleum)<br>Sale of cloves, clove oil and coffee prepared in Vavatenina (barter with Chinese traders) | In the village: self-consumption, local sales, barter: rice vegetable, edible leaves, fruits<br>Sales in Vavatenina with the goods carried on the back/head<br>Traders come to the hamlets to collect the cloves<br>Sale of lychees to middlemen (who work for exporters) and set up where the track meets the paved road (2.5 km from the village) |

### ♦Land use mapping and diachronic analysis of the study area

The study area was mapped using very high spatial resolution arial photographs acquired by drone in June 2016. To ensure complete coverage of the areas overflown, the aircraft's flight paths, and automatic release frequencies were adjusted to obtain a 60 % longitudinal overlap and a 30 % lateral overlap. The geometric distortion (fish-eye effect) caused by the type of camera on board the drone, as well as variations in the topography and in the pitch and tilt of the drone during each flight were corrected using projective transformation functions. The projections were based on several anchor points collected with a GPS or obtained from previously georeferenced and ortho-rectified satellite products. The aerial photos obtained were combined in a mosaic with a spatial resolution of 0.63 m. A total of 74 % of the study area was covered. The remaining 26 %, corresponding to valley bottoms mainly occupied by dense AFS, were mapped from satellite imagery available on the Google Earth virtual globe. Photo interpretation of the mosaic was based on *in situ* observations to confirm each type of land use zoning. Using the Dandoy map, particularly the main trails and paths that have barely changed since 1966, we were able to geo-reference and digitize the information, and thus to compare it with our 2016 land cover map. Most of our historical information came from old documents, journal articles and reference works written by botanists, agronomists or geographers who had resided in Madagascar since the 1900s. Most were written in French. They are listed in the bibliography.

### ♦Surveys in Vohibary to document agroforestry practices, product uses, and local perceptions of change

In 2016, the structure and composition of 12 AFSs belonging to agricultural households in Vohibary were characterized. They were selected according to the local definition of an AFS, i.e. a cultivated land with several herbaceous and perennial species in association, other than rainfed rice, and necessarily with edible species. The characterization of the studied AFS was based on farmers' reports and *in-situ* observations of the number of plants of each species present in the AFS and their age class (i.e. productive or juvenile). The different types of AFS were distinguished according to these criteria, and the AFS identified helped us classify the land uses mapped by drone in 2016. We conducted surveys of the households who owned the AFS to collect data to (i) describe the different uses for self-consumption and ways of sale of agroforestry products, (ii) estimate self-consumption of fruit and wood originating from AFS, and (iii) explore the practices used to establish an AFS. Semi-structured interviews with the village chief and the customary authorities (*tangalamena*) helped understand the changes that have occurred in and around Vavatenina. This information was used as inputs for our diachronic mapping analysis of the Vohibary landscape and to identify the key facts that have remained in the collective memory.

## 3. RESULTS

### ♦Description of Vohibary landscape in 1966

In 1966, the area under shifting cultivation (*tavy*) accounted for 10.8 % of Vohibary total land area, while fallow (*savoka*) accounted for 66.66 % (Figure 3-2**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**.A, Table 3-2). Three quarters of the territory was thus deeply imprinted by *tavy* (defined below) at that time. *Tavy* is rooted in the Betsimisaraka ethnic culture (Perrier de la Bâthie 1921, Kiener 1963, Dez 1966, Le Bourdiec 1974).

*Table 3-2: Comparison of land use in the Vohibary region, in 1966 (from Dandoy 1973) and in 2016: changes in the cultivated surface area in each cropping system*

| 1966 | | | 2016 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Land use** | **ha** | **%** | **Land use** | **ha** | **%** |
| *Surface area occupied by cultivated plants, mainly perennial species* | | | | | |
| Orchard | 6.8 | 3.2 | Cloves in monoculture | 19.7 | 9.3 |
| Clove plantations | 3.8 | 1.8 | Cloves in complex AFS | 7.4 | 3.5 |
| Coffee plantations | 24.4 | 11.4 | AFS with fruit trees | 9.8 | 4.6 |
| | | | AFS with wood trees | 12.5 | 5.9 |
| | | | Mixed AFS | 22.1 | 10.4 |
| *Surface area occupied by annual crops* | | | | | |
| Secondary crops | 3.6 | 1.7 | Secondary crops | 6.3 | 3.0 |
| Slash and burn (*Tavy)* | 23.1 | 10.8 | Slash and burn (*Tavy)* | 0.6 | 0.3 |
| Irrigated rice field | 6.2 | 2.9 | Irrigated rice field | 13.2 | 6.2 |
| Unexploited lowlands | 4.9 | 2.3 | | - | - |
| *Surface area not cultivated or at the start of cultivation* | | | | | |
| Wooded fallow (*savoka*) | 0.5 | 0.3 | *Savoka* at the start or in the process of cultivation (clove plantations) | 117.8 | 55.8 |
| Fallow land (*savoka)* | 132.8 | 62.2 | | | |
| Remnants forest patch | 7.3 | 3.4 | | - | - |

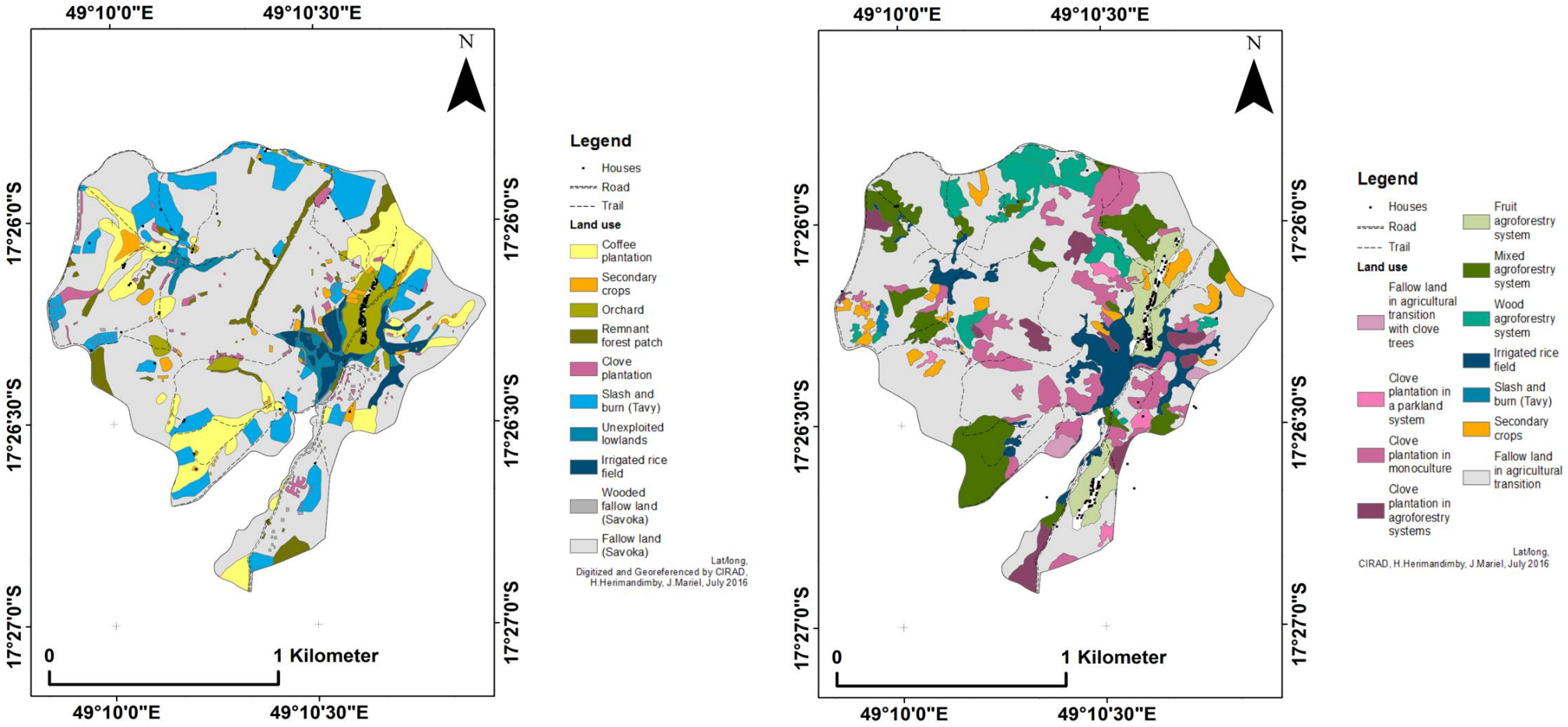



*Figure 3-2: Land use map of the agricultural landscape of Vohibary: (A) in 1966 after Dandoy (1973); (B) in 2016 (map based on aerial photographs combined with field surveys) (map digitized and georeferenced by H. Herimandimby and J. Mariel, July 2016)*

*Tavy* is defined as the cultivation of upland rice, or other crops (maize, beans, groundnuts, cassava) without plowing, after slash-and-burn of natural forest, or secondary forest (*savoka*) (Kiener 1963, Aubert et al. 2003). *Tavy* consists of successive stages: coarse deforestation of a forest plot by cutting down trees, burning the wood and shrubs and herbaceous vegetation, then sowing rice as the first annual crop, with superficial weeding, and harvesting (generally with low yields). After two to three years under rice, or other annual species, the plot is set aside for a period varying from seven to 10 years to allow soil fertility to regenerate. After clearing and burning, holes were made in the ground with a stick (no plowing) and combinations of seeds of maize, sesame, or lentils were sown (Dandoy 1973) (Figure 3-3.A and B). According to (Torquebiau 2000), *Tavy* corresponds to an ancestral form of sequential agroforestry in which not cultivated trees and crops are not to be found simultaneously on the same piece of land, but follow each other in time. This point distinguishes it significantly from the clove tree AFS.

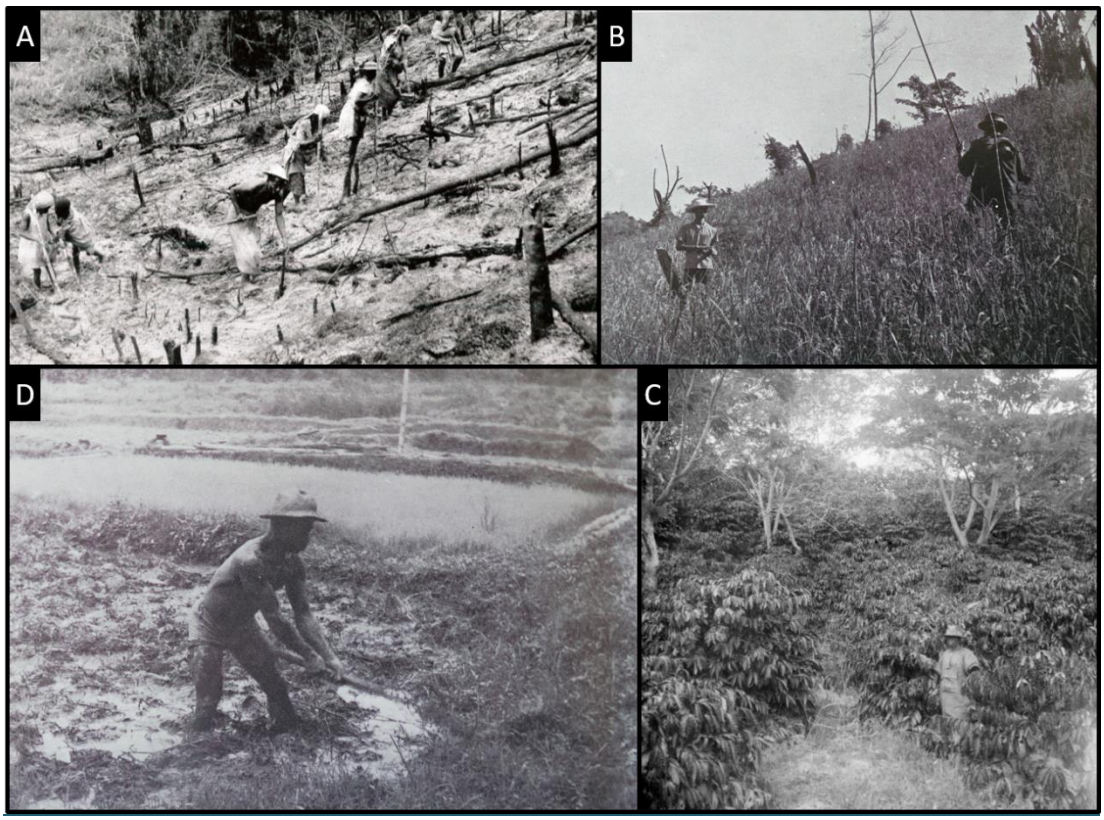



*Figure 3-3: (A) Sowing rain-fed rice in a tavy in the 1960s (Kiéner 1963). (B) Tavy ready for harvest at Vohibary in 1966 (Dandoy 1973). (C) Coffee plantation under Albizzia lebbeck on the Malagasy east coast in the 1930s (photo Ledreux © CIRAD). (D) Installation of a rice field in the 1960s in Vohibary (Dandoy 1973).*

Savoka is the name given to the fallow vegetation that grows following *tavy*, after cropping is abandoned. The savoka that replaces the forest is a dense thicket, rich in *Afromomum angustifolium*, *Psiadia altissima*, *Neyraudia madagascariensis* or *Clitoria lasciva*, that is gradually replaced by a secondary forest with reduced biodiversity and the dominance of species such as bamboo, *Ravenala madagascariensis* or *Harungana mdagascariensis* (Perrier de la Bâthie 1921, Dandoy 1973). But with an

increase in the number of *tavy* cycles, the savoka vegetation becomes poorer and soil fertility decreases. At the time of Dandoy's study (1966), some strips of mature forest were still present but accounted for only 3.4 % of the area studied. The main perennial crop cultivated was coffee, which accounted for 11.4 % of the total area (Figure 3-3.C), followed by clove trees but accounted for a much smaller area (1.8 %) while only half the lowlands had been converted into paddy rice fields (Figure 3-3.D).

### ♦Changes between 1966 and 2016

The comparison of land use in 1966 and 2016 revealed a set of changes in cropped and uncultivated areas (Figure 3-2.B, Table 3-2). First, this comparison highlights the almost complete disappearance of *tavy*, which dropped from 23.1 ha to 0.6 ha. The land under *tavy* was mainly transformed into plots of perennial species and annual food crops (secondary crops). Another major change was the disappearance of mono-cropping of coffee trees. These areas were replaced by diversified AFS, generally dominated by clove trees, associated with other fruit trees, vanilla, timber species and some remaining coffee trees. There was an almost 88 % increase in the area under clove trees, all types of systems combined (Figure 3-4). There was a 75 % increase in secondary crops in the total area occupied by annual crops, compared to the 1966 map in which *tavy* dominated annual cropping systems. In 1966 and today, annual crops are mainly cassava, sweet potato and some sugar cane (for the production of a local alcohol called *betsa betsa*). Lastly, the comparison of land use maps showed a 110 % increase in land under paddy rice, now cultivated in lowlands not yet exploited in 1966 plus on some of the lower *tanety* slopes where water is available.

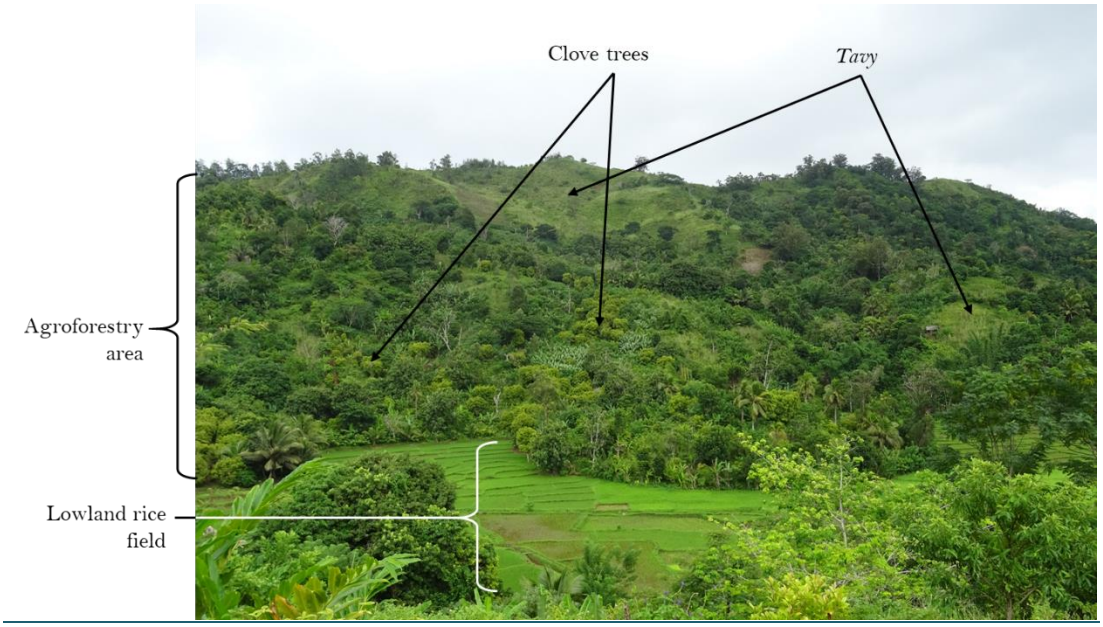



*Figure 3-4: Several types of agroforestry systems with tavy field plots covering tanety landscape (©J.Mariel).*

The comparison of the two land use maps also revealed changes in uncultivated areas. The vestiges of mature forest remaining in 1966 had completely disappeared in 2016. Part of the fallow vegetation (*savoka*) was converted into clove plantations (as monoculture, in AFS and in parklands). Field observations notably revealed diversification of part of the old wooded fallow (*savoka*) in wood-based AFS (Figure 3-5).

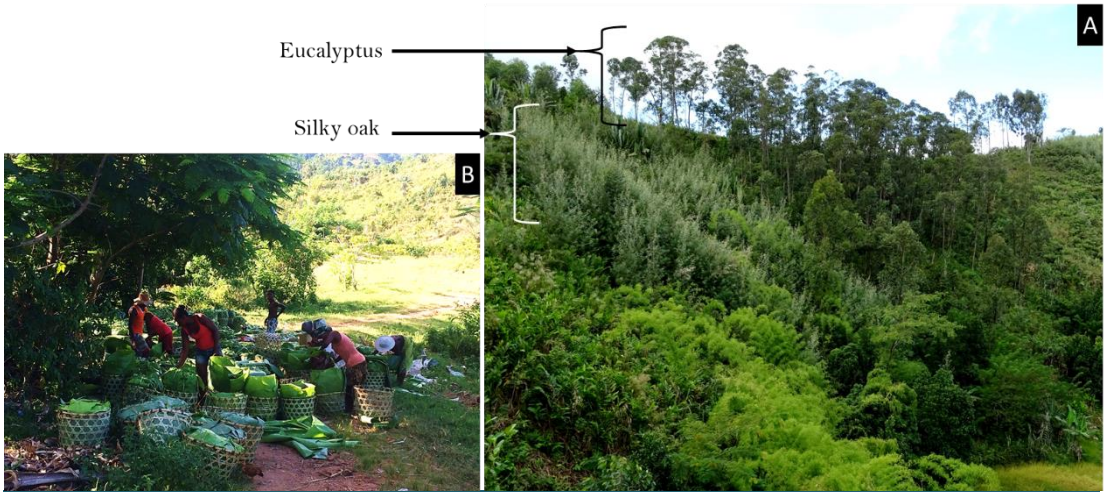



*Figure 3-5: (A) Agroforestry system with timber species (Vohibary, 2019) (©J.Mariel). (B) Packaging of lychees before delivery to the middleman, Vohibary, November 2019 (©J.Mariel)*

## 4. DISCUSSION

### ♦A shift from subsistence agriculture to the monetarization of crop productions: drivers and consequences of the changes related to rice production

Rice is a key staple food for Malagasy people. The Betsimisaraka ethnic group cultivated rice to be self-sufficient in two different ways: traditionally on tanety by practicing shifting cultivation (*tavy* rice) but also in the lowland in irrigated systems (paddy rice). Our diachronic analysis of land uses in Vohibary landscape highlighted two major changes in local rice production. First, the abandonment of the traditional practice of *tavy* and second, the expansion of irrigated rice in the lowlands. We now review the drivers of these changes and their consequences for farmers' food production strategies and income, and for the landscape.

The end of the traditional *tavy* practice: drivers and consequences

Rainfed rice on *tavy* was the first form of agriculture practiced by farmers in Madagascar, as far back as the testimonies go (described by botanists such as Perrier de la Bâthie (1921). *Tavy* aimed at ensuring farmers' rice self-sufficiency and later became nearly complete self-sufficiency. Dandoy (1973) estimated that the average yield was approximately one ton of paddy per hectare, but other authors reported much lower yields. Kiener (1963) estimated paddy yield at between 500 kilograms and one ton in the first year of the *tavy* supplemented with a little cassava in the second year, but yield

could drop to 250 kilos in the case of drought (Rabearimanana 1987). *Tavy* rarely enabled household self-sufficiency, and farmers often gathered supplementary forest products (Le Bourdiec 1978). Dandoy (1973) also reported the physiological and nutritional hardship of families subsisting on *tavy* alone.

The "Code des 305 articles" enacted in 1881 by Queen Ranavalona II, punished anyone who destroyed the forest to create fields in which to grow rice, corn or any other crop by five years of jail (Thébault 1960). The ban was kept in successive French legislation, but, in practice, was never implemented, due to lack of the necessary resources and the vast territory to be controlled (Lavauden 1934). *Tavy* deeply imprinted the landscape: the gradual retreat of natural forest produced a hilly tanety landscape, mainly covered with *savoka* and pasture land, sometimes containing some strips of remnant forest towards their summits, or even more rarely, completely wooded as described by Perrier de la Bâthie in 1922. In the Vavatenina region, natural forest probably disappeared long ago, as in 1899, Zimmermann (1899) estimated that opposite Tamatave, the retreat of the forest from the waterfront was 70 to 75 kilometers. Vohibary is located in this coastal strip, its distance to the coast is about 25 kilometers. The farmers of Vohibary kept on practicing *tavy*, and developed clove tree plantations, but the contribution of the clove tree to deforestation seems minor, the plantations being carried out in the savoka which, in 1966, represented 70 % of the landscape of Vohibary (Dandoy 1973). Nevertheless, it is possible that a few forest fragments have been cleared to be transformed into clove plantations, as Petit (1965) observed in 1965 in the village of Ankofa (Antongil Bay), leading to the disappearance of the remaining vestiges of forest. But this remains a marginal event.

The successive vegetation states that follow several *tavy*-fallow cycles are now well described and involve an irreversible shift from a tree stand to shrubs and subsequently to herbaceous vegetation (Kiener 1963, Aubert et al. 2003, Styger et al. 2007). This shift is visible on the two maps in Figure 3-2**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**. In 1966, 3.4 % of Vohibary land, particularly on the ridges, was still covered with forest, the last remaining traces of the original forest cover. In 2016, these last shreds of forest had disappeared, replaced by more or less diversified perennial plantations and forest plots inherited from *savoka* vegetation, but also plots planted with useful species. Due to population growth and the resulting pressure on land use, *tavy* rice production became unsustainable. The balance between the productivity of the plots, the length of the fallow periods, the loss of soil fertility and the growing number of mouths to feed was upset in Vohibary, where the population has increased almost four-fold.

Lowland rice production for self-sufficiency: an unrealistic goal

Paddy rice (irrigated rice) has long been grown in the lowlands alongside *tavy* rice as they are complementary (Le Bourdiec 1974). In 1966, the survey conducted by Dandoy (1973) showed that rice cultivation areas were divided between *tavy* (23.1 ha), irrigated lowland fields (6.2 ha) and unexploited lowlands (4.9 ha). In 2016, rice production was concentrated in irrigated lowland fields (Table 3-2), and to a lesser extent in clove parkland, in which the main accompanying crop is rainfed rice (1.9 ha).

Farmers have therefore changed their rice cultivation system from *tavy* to irrigated rice farming. Rabearimanana (1988) explained the determinants of this change in the highlands, but some elements also apply to the east coast. A major driver of these changes was population growth, together with the increasing appetite for rice at the expense other food products, maize, cassava, yams, sweet potatoes, for cultural reasons. This driver was also combined with the distribution of the work force which had to be spread more over cash crops (coffee, cloves, etc.) than on *tavy* rice production. Lowland rice cultivation was strongly encouraged by the French government. Chabrolin (1965), the Head of the Rice department at the Institute for Tropical Agronomic Research and Food Crops, still wrote "Tavy *rice farming should only be tolerated on soils where there is no risk of erosion) […] which might seem to encourage it. On the contrary, irrigated rice cultivation should be expanded and perfected as much as possible*". However, this type of rice cultivation required ground leveling, water capture, construction of canals and bunds, drainage systems, and time-consuming cultivation practices including soil preparation, plowing, nursery, transplanting, and weeding (Figure 3-3). Irrigated rice is thus very labor-intensive and required an average of 157 working days per year and per hectare. But since it enabled two crops a year, yields were more than twice that of *tavy* rice: 2,200 kg/ha versus 1,000. In fact, the return to labor was multiplied by four: 14.1 kg of paddy rice per working day versus 3.9 kg for *tavy* rice (Dandoy 1973).

However, the intensification of lowland rice cultivation was not able to feed the increased population of Vohibary. As early as 1947, Tourneur (1947) observed that Malagasy farmers were planting food crops in the inter-rows in their AFS to ensure their own food security, and this is still the case today. In 1966, assuming intensive cultivation of the entire lowland and two annual harvests, Dandoy (1973) estimated that paddy production would cover only 2/3 of the village's needs. In the interviews conducted in 2016, local and customary authorities unanimously pointed to the increasing lack of sufficient land to cultivate enough rice for each household and only two of the nine farmers surveyed were self-sufficient in rice. The use of AFS crops and the monetization of agricultural production have therefore become essential to meet the food needs and in particular, the volume of rice needed by farming households.

### ♦The diversification of crop and production systems: the origins of the current agroforestry landscape

The abandonment of *tavy*-based agriculture was accompanied by the introduction and appropriation of cash crops by smallholder farmers, particularly coffee, which was more profitable than other cash crops. However, according to Rabearimanana (1988), along the coast, *tavy*-based agriculture was abandoned late, i.e. between the 1940s and 1960s. We now review the factors that contributed to the diversification of crops and productions systems and hence to shaping the agroforestry landscape today. We describe the agroforestry practices we documented in 2016 and their evolution in response to environmental and socio-economic factors.

The exchange economy via cash crops on the colonizer's initiative: the beginning of the monetarization of agriculture

The first cash crops for export took place on the island of Sainte-Marie (French since 1814) at the beginning of the 19th century (Decary 1937). On the big island, the shift from self-sufficiency to diversified agriculture based on perennial crops began with French colonization in response to the concern of the colonizer and the desire of General Galliéni, the first governor of Madagascar (1896 to 1905), to achieve the successful agricultural development of the island and contribute to its economic independence. The governor wanted to improve existing crops and introduce new crops to support the economic development of the Malagasy population, but also with the ambition to feed the export chains and consequently enrich the colonizing power (Galliéni 1908, Scales 2014). The colonizer's first approach was to try to increase local production by *"using the forest and the bush for their spontaneous products"* (Célérier 1932). Between 1896 and 1905, the main products exported were gold, natural rubber, beef from zebus, skins, raffia, wax, wood, pulses. These products were soon followed by the first introduced crops, vanilla and cloves, but in much smaller quantities (Galliéni 1908, Célérier 1932, Danthu et al. 2016). Rapidly, the colonial power imposed the development of recently introduced industrial crops that had already been tested in Madagascar by obliging small-scale farmers to create plantations. One of the means was the implementation of heavy taxes on agricultural production, whose objective was to stimulate cultivation and harvesting for export (Jacob 1987). Thanks to its warm and humid climate, the eastern side of the island has become the privileged zone for productions intended for export (Salomon 1982). This was particularly the case in the province of Fénérive-Est, in which cash crops were introduced in 1898: *"These areas are fertile, if we judge by the vigor and the good appearance of the plantations […] that surround the villages; however no tropical crops: coffee, cocoa, vanilla, cloves, etc. have been attempted yet"* (JODM, October 6, 1898, after Cocoual and Danthu 2018). The first crop promoted by the administration in the Vavatenina area was coffee, particularly after the First World War, and later, around 1930, clove trees (Dandoy 1973).

Coffee, the first industrial crop Malagasy farmers were forced to grow

Under pressure from the colonial power, smallholder farmers were obliged to grow coffee. This colonial decision to promote the cultivation of coffee was based on the fact that, at that time, French coffee consumption depended to a great extent on imports of coffee from Brazil. The first *Robusta* coffee plants were distributed by the Ivoloina test garden in 1906 (François and Ledreux 1929). More than 80 % of coffee was produced on the east coast and partly on small Betsimisaraka peasant plots to supplement insufficient production by colonial plantations (Chevalier 1946, Fremigacci 1986, Rabearimanana 1987). Dandoy (1973) reported that the introduction of coffee met strong resistance from farmers who were told to use their best soils (alluvial land, low slopes, thalwegs) and who were not accustomed to managing tree crops other than by picking. As a result, cultivation practices were generally minimal, which *"contributes to giving the plantations the appearance of an abandoned crop"* (Dandoy 1973). However, the farmers' reluctance to grow cash crops was offset by economic pressure

in favor of these crops: the need to find an alternative to *tavy* that was increasingly unable to cover food self-sufficiency, and the possibility of raising money from farming, if only to pay the colonial tax. This context explains why, in the Vohibary territory in 1966, 11.4 % of the area was devoted to coffee while *tavy* was declining, but had not yet been completely abandoned.

However, already in 1966, Malagasy coffee dynamics had begun to weaken. It should be noted that coffee was subject to a succession of crises between 1930 and 1960 that affected coffee producers' confidence in obtaining a sustainable income from coffee. The first crisis was linked to determination of the colonial planter and of the administration to maintain high export prices, which made Malagasy coffee less competitive. The second crisis was a consequence of the blockade of Malagasy exports during the Second World War. The third crisis was linked to global coffee overproduction at the beginning of the 1960s and of new coffee producing countries entering the world market. The fall in producer prices continued from the 1960's to the mid-1980s and at the same time, the ratio of the price of coffee to that of paddy, a vital criterion for Malagasy producers who have to buy the rice they do not produce themselves, was halved (Blanc-Pamard and Ruf 1992). The sector declined and the farmers no longer renewed their coffee trees. The comparison of the two maps illustrates these dynamics: coffee plots in the Vohibary region completely disappeared between 1966 and today. However, a small population of coffee trees, often residual and not very productive, is still present today particularly in AFSs (we counted between 10 and 50 trees in the plots we visited). Few of the farmers in Vohibary actively renewed their plantation, most only kept trees left over from the coffee plantations established in the colonial period. The yield of these coffee trees supplied a small local marketing chain and was also grown for self-consumption, as Malagasy inhabitants had gradually become coffee consumers themselves. But the small quantities of green coffee beans sold (between 5 and 50 kg), the low prices plus the poor quality of the products on the market confirmed farmers' disinterest in coffee.

Cloves replace coffee: the farmers' decision preceded that of the colonizer

To offset the shrinking coffee sector, the colonial authorities tried to promote alternative crops: pepper, vanilla, oil palm, cocoa, tea and especially cloves (Dumont 1959). The smallholder farmers on the East coast started cultivating clove trees very early on, the first clove trees were introduced in Sainte-Marie in the 1820s. Compared to coffee, clove trees have the advantage of growing in all types of soils, even the poorest, and hence also in fallows (*savoka*) and laterite soils which, before this crop was introduced, had remained unused (François 1927). The clove tree is not very sensitive to disease, its maintenance is not very difficult, it reproduces easily by natural sowing, and the cloves are simply collected and dried. In addition, cloves are used to make a second product with high added value: clove oil obtained by distilling clove tree leaves in stills. This oil production expanded very early on the east coast, the first distillations of clove leaves were carried out in 1911 in Sainte-Marie (François 1927, Ledreux 1928, 1932). Clove trees have only three disadvantages: low wind resistance in an area subject to regular cyclones (François 1927, Ledreux 1928, 1932, Donque 1975), sensitivity to a leafminer, *Andretra* (Frappa 1954) and irregular interannual yields (Danthu et al. 2014). This context explains

why, very rapidly and before being asked to do so by the administration, small-scale farmers planted clove trees in their plots without respecting the agronomic recommendations given by extension technicians (Arimalala et al. 2019).

Dandoy (1973) reported that from the 1930s on, Vohibary farmers planted clove trees generally by scattering seeds in the fallows or secondary forest regrowth (*savoka* and wooded *savoka* after a *tavy* cycle). The trees produced buds and during the rice shortage period, some farmers trimmed their trees to produce clove oil they distilled by hiring a distiller in a neighboring village. Less demanding than the coffee tree, easier to maintain, clove trees appeared to be suited to the natural conditions of the Vohibary landscape and its inhabitants. In 1966, there were 2,700 clove trees, of which 1,900 were less than seven years old, accounting for 1.8 % of the land. The 2016 map confirmed the trend: more than 14.5 % of the region was cropped with clove trees (Figure 3-4, Table 3-2). Interviews with farmers indicated an average of 223 ± 79 productive and juvenile trees per household, distributed in several plots, grown either in monoculture, parkland, or complex AFS, where the average was around 55 trees versus 93 ± 62 in 1966. The similar proportion of juvenile plants in 1966 (Dandoy, 1973) and 2016 confirms the intention of farmers to maintain and increase their plantations by renewing old and non-productive trees. Indeed, to cite a young farmer we interviewed *"here, if you don't have clove trees, people don't take you seriously"*.

Our 2016 surveys highlighted different trajectories leading to the different clove-based systems mapped in Vohibary territory. For example, a young farmer who inherited a fallow plot (*savoka)* planted clove trees and took advantage of the shade provided by the *savoka* species to protect young clove trees in the first years. Later, the *savoka* species were cleared and replaced by perennial crops, such as fruit and woody trees, but also food crops, notably cassava. Another option consisted of clearing, then burning, followed by cultivating annual species for two or three years, mainly rainfed rice, cassava, and sweet potatoes, and simultaneously planting cloves, often associated with other species. The frequent cyclones in Vavatenina (Donque 1975) also influence the planting of perennial crops and in particular clove trees. Surveys and field observations suggest that planting dynamics have not been constant. In particular, we observed a high proportion of young clove trees in the Vohibary landscape, which, according to producers, were probably less than 20 years old. Unlike the older plantations (planted before 1930), which are generally monoculture or, more rarely, parkland, this wave of recent plantations has mainly been part of setting up complex AFS. Farmers reported that perennial crops were widely abandoned around Vavatenina following the two violent cyclones, Honorine in 1986 and Bonita in 1996, that destroyed a significant proportion of the clove plantations covering the *tanety*. Men migrated temporarily to other regions, especially to the north, to find other sources of income, and planting perennial crops only started again around 2000.

### ♦The diversification of cropping systems and products to cope with environmental (deforestation) and socio-economic changes

The species at the origin of diversification and their uses

Dandoy (1973) reported that households of the Betsimisaraka ethnic group usually had a real home-garden that included different fruit trees, coffee trees and cloves. He also reported that diversification was essential to compensate for the shortage of rice during the lean period that can last up to three months from January to March. Cassava, taro, yam, or plantain were consumed by the villagers who were mainly food self-sufficient. Local fruits were an important food supplement: pineapple, lychees, apple-cinnamon, avocado, bananas, jackfruit and citrus including tangerines, oranges, grapefruit, and an orange-tangerine hybrid. Breadfruit was and is still widely consumed during the 3-month lean period when it replaces rice. Dandoy (1973) did not mention having observed this species in 1966, even though it seems to have been abundant in the region (François 1927). Although rich in carbohydrates and therefore a good source of energy, breadfruit is very poor in other nutrients, and farmers interviewed did not considered it as food of good nutritional quality. Overall, the diet was not nutritionally balanced as it lacked protein and lipids. Poultry failed to provide the necessary amount of protein and the rare local zebus (nine zebus were counted in the village in 1966) were reserved for animal traction in the rice fields. Since the 2000s, there has been a considerable increase in livestock rearing as a means of diversification. Breeding small livestock appears to be playing an increasingly important role, particularly pigs, which provide households who have little land with a source of income. Breadfruit and jackfruit are widely used to feed pigs.

The context changed after the 1990s thanks to the opening of an export market for lychees, departing from the port of Tamatave (Jahiel et al. 2014). The main production area for lychees for export extends along the east coast and includes the district of Vavatenina. The sector is supplied by a multitude of small producers, who sometimes only have a few trees scattered through their plots rather than real "lychee orchards". In Vohibary, the trees are often planted at the edge of monoculture clove plots, in homestead orchards or in home-gardens and AFS. The 12 AFSs we surveyed had between two and 20 productive lychees per plot and only two contained no lychee trees. Farmers sold their production to middlemen who work for exporters and visit even the most remote villages when possible (Figure 3-5.B). Nevertheless, isolation and access - or lack of access - to markets influence the production and marketing of lychees. Due to difficult transport, fruit collection vehicles only come to the Vavatenina district for supplies at the end of the season (end of December) and the quantities collected are adjusted according to the quantities collected from other districts (Jahiel et al. 2014). This harvest policy means isolated farmers cannot be sure they will sell a fixed and significant quantity of lychees every year, and lychees thus remain above all a self-consumed product. All the households we surveyed consumed lychees in quantities per person can be very high: on average 68 kg and up to more than 100 kg over the entire production period from mid-November to the end December. Vanilla is less widely cultivated by farmers than on the north coast of Madagascar due to its demanding and

often poorly known technical itinerary in our study area, where the necessary skills are limited, and inter-annual production fluctuates. Very low to very high price variability, from US$ 35-500/kg has been recorded over the past 15 years. At the district level, vanilla was already cropped in 1966 but to a very limited extent. According to Dandoy, in 1966, *"vanilla is a marginal crop in the process of being abandone"*. However, in 2016, among the 12 AFS we visited, three produced vanilla, and the villagers reported that more and more farmers were planting vanilla in their AFS. Its recent very high sales price is a strong incentive to replant vanilla. Pepper is the least frequently planted cash crop. It was only present in two AFS, with an average of ten plants in each. The majority of the plants were introduced recently, and pepper is not considered as a major source of cash for farmers as prices remain low and the value chain in the district is poor. Also, according to Dandoy (1973), sugar cane was reported to be almost abandoned, yet in 2016 it was still present although often only in a small patch cultivated in an AFS or another *tanety* for alcohol production. It is doubtful whether sugar cane will continue to be cultivated in the future because the uses that Betsimisaraka made of it, particularly for the production of *betsa betsa*, a fermented drink shared during the ceremonies of commemoration of the dead, are progressively disappearing. Some farmers diversify their AFS with other cash crops, cola (*Cola acuminata*), ravintsara (*Cinnamosma madagascariensis*), pink berries (*Schinus terebinthifolius*), or honey. However, this concerns only a minority of those we interviewed, and production remains negligible due to the absence of a market in the district.

The agroforestry systems: the new source of wood

The disappearance of forest, already very advanced in 1966, was complete in 2016. However, it should be noted that the supply of wood for construction or fuel for both family consumption and for distilling clove oil did not appear to be problematic in 1966 (Dandoy, 1973). Today, wood resources mainly originate from AFS. Wood as a source of energy has several origins: cultivated species including old fruit trees that are no longer productive or dedicated "firewood" species such as eucalyptus (*Eucalyptus robusta, Eucalyptus camaldulensis*). These species were introduced in Madagascar very early, during the 19$^{th}$ century (Verhaegen et al. 2011), as they provide the best quality wood. Firewood can also be collected in areas where *Grevillea banksii* thrives, an easily dispersed species that was introduced in Madagascar and is today considered as a weed (Tassin et al. 2009). The total volume of wood consumed in a year varies with the number of people in the household, the presence of animals and the number of distillations for the production of clove oil. The quantity of wood used for cooking was difficult for the respondents to assess, which explains the significant differences reported: from 2 and 10 m$^3$/person/year. This is an average and does not include farmers who reported high consumption due to a particular activity, such as distilling other products or activities involving cooking (selling cakes in particular). Indeed, farmers who give cooked products (tubers) to their pigs, also consume more wood. The volume of wood used for cooking by all farms was much higher than that used for distilling. Regarding timber, the species used depend on the type of building required and some of these species are native. For the construction of a traditional home, the most frequently used

species was and is still Bamboo, which confirms its importance in Betsimisaraka regions (Decary 1962). Another common species is ravenale (*Ravenala madagascarensis*) which is used for roofing huts, among other things (Rakotoarivelo et al. 2014). Other species can be used to make round poles, the main species being *tsopatika* (*Streblus dimepate*), *ampaly* (*Streblus mauritianus)* and *hintsina (Intsia bijuga*). Eucalyptus and pine, introduced species, provide the best quality wood, and are preferentially used for the construction of concrete houses.

The development of cash crops-based agroforestry: a way of reforest degraded land or a driver to more forest conversion?

The transition from the shifting cultivation to cash crops-based agroforestry is closely dependent on the environmental and socio-economic local conditions. This explains why the agriculture of many other Malagasy regions, that do not benefit from the same climatic and ecological conditions and marketing infrastructure as the northeast coast, remains a subsistence agriculture based on the production of irrigated and rainfed rice, cassava, maize, and small-scale livestock (Dabat et al. 2008a). In the northwest of Madagascar, the conversion of primary forests and fallow seems mainly driven by the farmers' need to acquire new lands for food production and the saturation of the lowlands to the production of irrigated rice (Ramboatiana et al. 2018). The same study reports that the first slash and burn of forests and fallows made by farmers is intended for food crops, mainly rice, and not for cash crops (vanilla and coffee). However, the decision to convert to cash crop systems remains possible only if households have sufficient land available and the market price of produce increases. In another district of Analanjirofo region, Andriatsitohaina et al. (2020) show through their land-use decision modeling approach that the farmer's objective to cultivate more cash crops lead to maintain and further develop mixed agroforestry systems. Apart from factors related to household strategies, the study reveals that institutional decisions, as the establishment of a protected area, also influence farmers' land use decisions. These studies confirm that the priority for households remains the cultivation of food crops and it is this objective that leads to deforestation rather than the cultivation of cash crops. These studies and our findings seem rather converge towards the idea that the development of cash cash-based systems by smallholders' farmers could contribute to restore degraded land through agroforestry practices.

The gradual change from a shifting cultivation for food production to cash crop-based agroforestry has also been reported in Indonesia (Aumeeruddy and Sansonnens 1994, Hariyadi and Ticktin 2012). Although these studies do not explicitly describe the drivers of this shift, they show how agroforestry with cash crops has become a way for farmers to continue supporting a growing agricultural population while land is shrinking due, in these cases, to the establishment of a conservation park to preserve biodiversity by stopping extensive agriculture. In Madagascar, as the establishment of protected area is often driven by decisions at the government level, i.e. ignoring the socio-ecological context, the development of cash crops in agroforestry is not perceived by farmers as an opportunity to adapt to the lack of lands and others environmental and economic changes.

## 5. CONCLUSION

The observed changes in cropping systems and local land use in the Vohibary landscape are evidence for the continuous adaptability of farmers to political, economic or environmental changes. The changes we describe in the small agricultural landscape of Vohibary apply across the whole Analanjirofo region. They are part of a historical trend whose determinants have been the global political and economic context, the population growth, and the degradation of environmental conditions. Local variations in farmers' strategies had three main drivers. Firstly, the introduction of cash crops contributed to the monetization of farming systems either for sale on the local market or for export. Secondly, cropping systems were intensified in response to the 3 % annual increase in population, which resulted in the generational fragmentation of land plus increased pressure on land, and the introduction of cash crops, which monopolized a significant proportion of the labor force and resulted in the abandonment of traditional *tavy* rice cultivation. Thirdly, crops were diversified to supplement insufficient rice production and to ensure a regular income, which resulted in diversification of production for export (vanilla, lychees, cloves and/or clove oil) or for the local market (fruit, possible surplus rice, tubers). Complementing the works of Arimalala et al. (2019) and Michel et al. (2021), our study shows that cropping systems in general, and AFS in particular, not only change in space and over time but also in their function, as also described by Nair (1985) and Torquebiau (2000).

The specificity of Vohibary, and more generally of the east coast of Madagascar, is that changes in farming systems were imposed by a strong administrative power whose objective was to supply export sectors by developing industrial crops. It established the means to do so by building the necessary infrastructures (port of Tamatave, Pangalanes canal) to ensure the transportation and export of agricultural products from the East Coast to the metropolis (Salomon 1982). The situation of the Malagasy East Coast is however not unusual and applies to other colonial contexts at the beginning of the 20th century, particularly to colonies belonging to Great Britain and France. They forced the development of what were then referred to as "colonial crops" in indigenous farming systems in order to feed supply chains destined for metropolitan areas (Volper 2011). The agricultural dynamics described here concern coffee and cloves in Madagascar, but it applies, *mutatis mutandis*, to cloves in Zanzibar (Conte 2019), to cocoa in Africa (Rice and Greenberg 2000, Schroth and Harvey 2007, Jagoret et al. 2011) and to rubber in Southeast Asia (Penot 2001), but also to Malagasy vanilla, Senegalese peanuts, Malian cotton, oil palm and bananas (Volper 2011), whose history sometimes remains to be written to trace the long-term trajectories of cropping systems and to clarify farmers' current strategies.

## 6. RÉSUMÉ ET TRANSITION

**Résumé :** Cette analyse diachronique entre 1966 et 2016 permet de mieux comprendre l'histoire de l'agroforesterie dans le paysage de Vohibary. Parmi les différents résultats obtenus, quatre d'entre eux représentent des évolutions majeures du paysage :

- La pratique du *tavy* a peu à peu été abandonnée au profit des plantations de girofliers, des agroforêts à bois ou bien des jachères en transition vers des parcelles cultivées ;
- La caféiculture sous ombrage n'est plus pratiquée et les caféières, qui couvraient 11,4 % du paysage en 1966, sont en 2016 devenues des agroforêts diversifiées à girofliers se mélangeant avec divers arbres fruitiers ;
- La culture du giroflier s'est étendue dans le paysage (+88 %) via différentes conduites agricoles, de la monoculture à des systèmes plus ou moins diversifiés et denses, qui révèlent une réelle adoption endogène de cette culture ;
- Une partie des terres arables en jachère (*savoka*) a été convertie en plantations de girofliers et en systèmes agroforestiers à bois.

Dans cet article, je discute des moteurs de ces dynamiques agroforestières et je montre qu'ils sont de différentes natures, qu'ils interviennent à des échelles différentes et qu'ils opèrent depuis près d'un siècle :

- La croissance démographique et ses conséquences sur la disponibilité des terres arables ont contribué à l'abandon du *tavy* qui ne permettait plus de couvrir les besoins en riz ;
- Nombre de paysan.nes ont adopté des stratégies reposant sur la monétisation de l'agriculture pour pouvoir acheter du riz, en cultivant du caféier, du giroflier mais aussi du vanillier ;
- La mise en concurrence des produits agricoles sur les marchés mondiaux et sa répercussion sur la rémunération des paysan.nes ont influencé les choix d'espèces à cultiver, expliquant ainsi le déclin du caféier et le boom du giroflier ;
- La volonté de préserver l'autonomie dans la satisfaction de besoins essentiels a contribué à une diversification et à une intensification des systèmes de cultures, conduisant à l'émergence d'une diversité d'agroforêts composées de cultures commerciales mais aussi de fruitiers, d'arbres à bois et de cultures vivrières, selon des abondances et des pratiques de gestion variables.

**Transition :** Cette première étude menée à Vohibary soulève plusieurs questions relatives d'une part à la généralisation de ces dynamiques à plus grande échelle et d'autre part à la dimension biophysique des déterminants de ces dynamiques. Dans un objectif de discuter de trajectoires résilientes des paysages anciennement forestiers, ce développement local de l'agroforesterie amène à questionner les modalités qu'impliquerait une restauration reposant sur cette pratique.

- Les paysages à l'échelle de la zone de Vavatenina sont-ils aussi le théâtre de dynamiques agricoles similaires ?
- Le milieu physique conditionne-t-il l'intégration de l'agroforesterie et des autres modes d'occupation du sol dans le paysage ? Et comment cela se traduit-il dans sa composition et dans sa configuration ? La troisième question relève des effets positifs de l'agroforesterie dans le cas de paysages anciennement boisés : est-ce que cette pratique peut contribuer à la restauration des fonctions de production et de régulation d'un paysage agricole et selon quelles modalités (par exemple biodiversité, renouvellement de la fertilité) ?



# Chapitre 4 |AGROFORESTRY FOR LAND RESTORATION : IMPLICATIONS FOR A DEGRADED LANDSCAPE ON THE EAST COAST OF MADAGASCAR

Juliette MARIEL[1, 2]

Hasina HERIMANDIMBY [3]

Vanesse LABEYRIE[1, 2]

Stéphanie M. CARRIERE [4]

Jacques BAUDRY[5]

Camille LELONG[6]

*Statut : En préparation*

*Revue : Agriculture, Ecosystems & Environment*




Photo : Zoom sur les nervures d'une feuille de plante observée à Vavatenina, Madagascar, 2016.

[1]*CIRAD, UMR SENS, 34398, Montpellier, France*

[2]*SENS, CIRAD, IRD, Univ Paul Valery Montpellier 3, Univ Montpellier, Montpellier, France*

[3]*Consultant, Lot VT1Ter VQSG Andohaniato-Ambohipo, Antananarivo 101, Madagascar*

[4]*SENS, IRD, CIRAD, Univ Paul Valery Montpellier 3, Univ Montpellier, Montpellier, France*

[5]*BAGAP, INRAE, Institut Agro, ESA, 35042, Rennes*

[6]*CIRAD, UMR TETIS, F- 34093 Montpellier, France*

## 1. INTRODUCTION

Agricultural tropical landscapes are at the heart of issues related to the resilience of small-scale agriculture and ecosystems, and concerning both the local and the global scale (DeFries and Rosenzweig 2010, Bailey and Buck 2016). The increasing demand in food production, partly resulting from the demographic growth and the shift towards more meaty diets, puts pressure on agricultural lands. This leads to the expansion of agriculture at the expense of forests, and to the industrialization of farming practices (e.g. monoculture, use of chemical inputs, mechanization, Foley et al. 2011, Andres et al. 2016, Stomph 2017). These agricultural dynamics result in the homogenization and the degradation of tropical landscapes, i.e. the loss of the functions (all the processes related to the flow of matter, energy and information in an ecosystem, Jax 2005) and services (benefits that humans derive from ecosystems, Millennium Ecosystem Assessment 2005) provided by ecosystems (Landis 2017, Scholes et al. 2018). However, these agricultural dynamics shape different landscapes depending on the cultural, socioeconomic and environmental contexts, which raises different resilience issues, particularly depending on the degree of deforestation and farming industrialization (Landis 2017). In landscapes with massive deforestation, the loss of biodiversity and its associated ecological, cultural or

economic functions is a major concern for the resilience of smallholders whose livelihoods depend on the ecosystems (Fischer et al. 2006, Sterk et al. 2017).

Landscape restoration aiming at *"re-establish ecological integrity and enhance human well-being in degraded forest landscapes"* (Maginnis and Jackson 2005) is a way to halt and reverse land degradation through sustainable land management that enables the recovery of the ecological functionalities. Its objective is to strengthen the resilience of social-ecological systems to global changes (Parrotta 2002, Maginnis and Jackson 2005). In the context of tropical agricultural landscape, the restoration implies the development of sustainable and resilient agriculture, such as a biodiversity-base agriculture, that shapes multifunctional landscapes (Jackson et al. 2007, Tscharntke et al. 2011, Landis 2017). In tropical forested landscapes, agroforestry systems, in which *"perennial woody species (trees, shrubs, palms, bamboo, etc.) are deliberately used on the same land management unit as cultivated species and/or animals, either in a certain spatial arrangement or in a temporal sequence"* (Zomer et al. 2014), are recognized as ecologically friendly practices and an effective land management strategy for landscape restauration (Nair 2011, Hillbrand et al. 2017, Santos et al. 2019). This practice conciliates the development of agriculture (especially cash crops) with the preservation of the ecosystem and its functionalities, and enhances the resilience of smallholders farmers to perturbations of different kinds (De Beenhouwer et al. 2013, Miller et al. 2020, Mbow et al. 2014b). However, most studies showing the restoration potential of agroforestry were conducted in agricultural landscape where forests are still present and where the challenge is also to prevent the deforestation. So far, few studies addressed this issue in a former forested landscape context.

If properly designed and managed, agroforestry can provide a range of ecosystems services (Jose 2009, 2012) and contribute to climate change mitigation and adaptation (Lasco et al. 2014). At the cropping system scale, the presence of trees is beneficial for the management of pests and diseases (Pumariño et al. 2015), the carbon stock (Ehrenbergerová et al. 2016), the soil fertility (Muchane et al. 2020) and the protection of crops against extreme and variable micro-climate conditions (Lin 2007). At the landscape scale, agroforests are proved to provide habitats for a diversity of plant and animal species (Bhagwat et al. 2008) as bees (Jha and Vandermeer 2010), birds (Clough et al. 2009) or primates (Guzmán et al. 2016). This practice also improves the soil fertility (Sileshi et al. 2020) and limits the soil erosion (Delgado and Canters 2012, Atangana et al. 2014). Generally, the presence of a wide range of species, herbaceous and perennial, and the way they are organized in cropping systems contribute to the landscape heterogeneity, as well as the way these different land-uses are integrated in the landscape. In landscape ecology studies, heterogeneity describes some structural properties of a landscape that are critical to define the objectives and modalities of a landscape restoration, in particular the biodiversity recovery (Turner and Gardner 2015, Lang 2019). Landscape heterogeneity can be characterized in terms of composition and configuration (Fahrig and Nuttle 2005). Composition refers to the nature of the different land-uses types and their relative proportions, and the configuration describes how these land-uses are arranged in space. Several studies show the positive impacts of

heterogeneity on the functioning and the sustainability of agricultural landscape (Fischer et al. 2006, Martin et al. 2012, Barral et al. 2015, Duarte et al. 2018). However, there is a lack of literature that specifically study the heterogeneity of an agroforestry landscape and its physical drivers, i.e. how farmers organize their cropping systems in the landscape in relation to physical factors.

This study proposes to analyze the case of an on-going agroforestry landscape in the North-Eastern coast of Madagascar, which transition from shifting rice cultivation has been led by local farmers since the 70's (Figure 4-1, chapter 3: Mariel et al. Accepted). Firstly, we used a remote remote-sensing method to characterize how small-scale agriculture and agroforestry practices structure the landscape according to topographic factors (altitude, slope, and slope's exposure). Secondly, we applied a landscape ecology approach to analyze the landscape heterogeneity and describe the configuration of agroforests in relation to the other land-uses. These analyses attempted to highlight the physical drivers of the landscape structure to address the physical dimension of the restoration (e.g. fertility regeneration, erosion reduction, prevention of cyclone risks), and to describe the contributions of agroforestry in landscape heterogeneity (composition and configuration) to address the ecological dimension (biodiversity recovery). Finally, our discussion provides some recommendations with the perspective of designing agroforestry landscapes to restore formerly forested lands.

## 2. MATERIAL AND METHODS

### ♦Study area

We focused our study on an area of about 84 square kilometers, located in the district of Vavatenina, in the Analanjirofo region on the North-East coast of Madagascar (Figure 4-1). We selected this area as its landscapes illustrate the deforestation related to the shifting rice cultivation (*tavy*) and the on-going diversification of farming practices through agroforestry (chapter 3: Mariel et al. Accepted). Indeed, the area was anciently called *Analambolo*, meaning "bamboo forest" (Dandoy, 1973) because of the bamboo-dominated fallows that covered much of the slopes. This type of secondary vegetation formed spontaneously, in place of primary forests after the practice of *tavy*. In 1966, Dandoy (1973) estimated that 60 % of the area was covered by fallows with varying species composition depending on their age, while primary forests shreds still persisted along the crests (Figure 4-2). Through these observations, Dandoy showed the deforestation related to the practice of *tavy*, especially around highly populated areas.

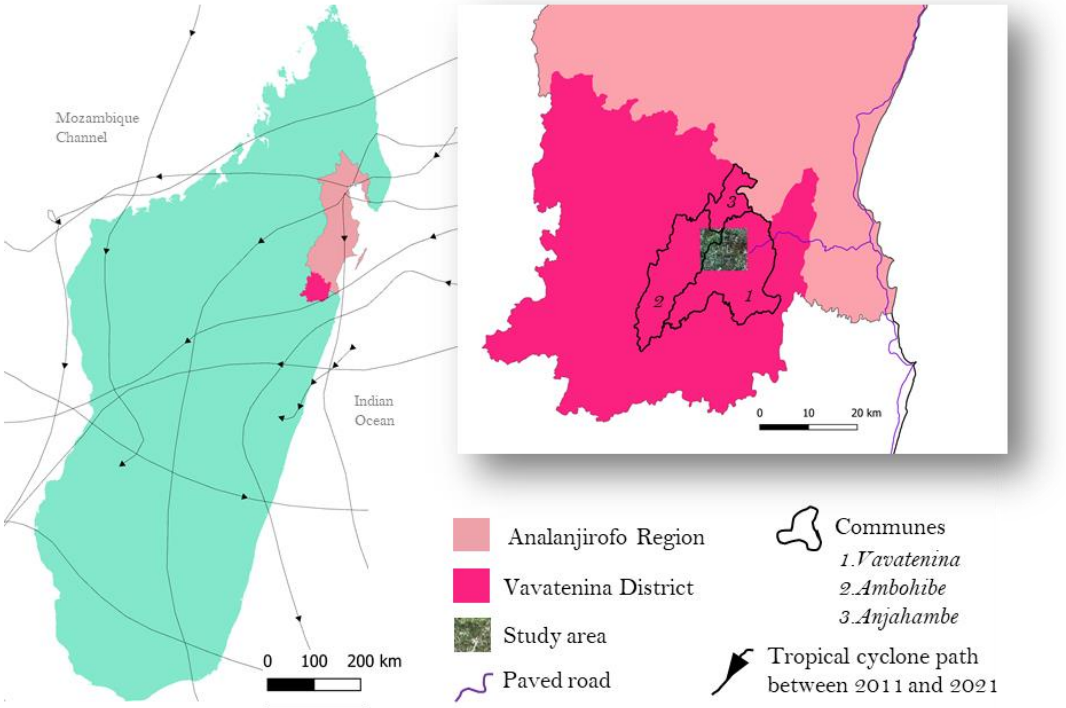



*Figure 4-1: Geographic location of the study area in Madagascar.*

The area is now experimenting a diversification (chapter 3: Mariel et al. Accepted) and is globally characterized by both cultivated and spontaneous vegetation (Vandermeer and Perfecto 1995, Altieri 2002), with an agriculture in transition to agroforestry practices with different types of cash crops (e.g. clove tree, vanilla, coffee). This recent and on-going development of agroforestry raises questions about the proportion represented by this land-use in the landscape relatively to the other land covers, and about the spatial distribution of agroforests and its drivers.

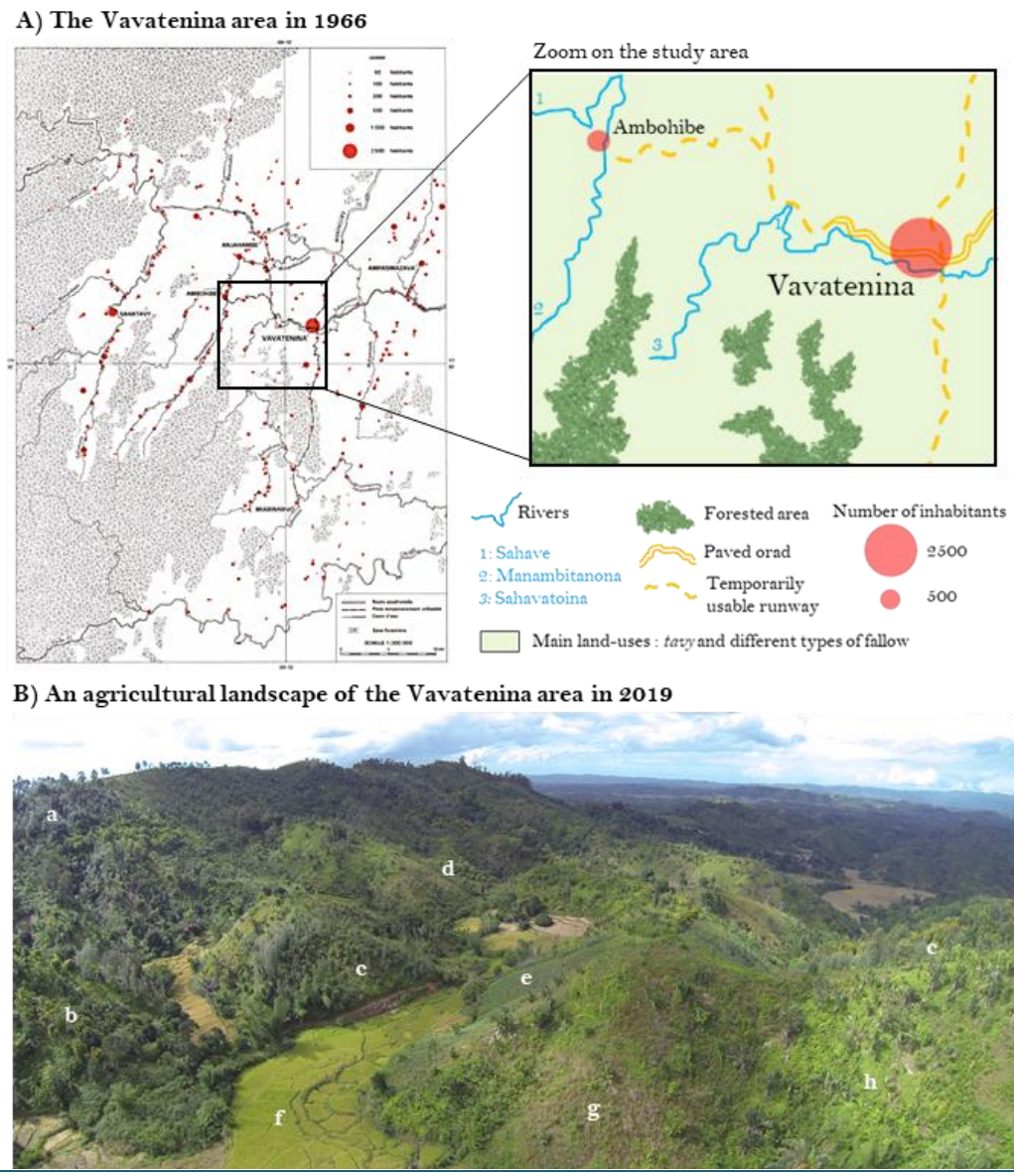



*Figure 4-2: (A) Map of the Vavatenina area in 1966 (figure taken from Dandoy 1973). The landscape was mainly occupied by* tavy, *fallows and some forested areas. (B) Typical landscape of the study area that can be seen in 2019 (©J.Mariel). The landscape is shaped by an uneven topography, made up of successions of small hills and narrow valleys wrapped over a North-East/South-East topographic gradient rising from about 90 to 690 meters. The landscape is a mosaic of different land-uses: a) plantation of silky oalks (*Grevillea banskii*), b) diversified agroforest, c) association of clove trees and silky oalks, d) clove monoculture, e) plantation of cassava, f) paddy rice in low-land fields, g) short herbaceous vegetation with ferns, h) herbaceous vegetation with bamboos, traveler palms (*Ravenala madascarensis*) and giant bramble (*Rubus alceifolius*).*

### ♦Spatial data

Satellite sensors such as Pleiades deliver multispectral images at very high spatial resolution (VHSR), i.e. with pixels covering less than a square meter. At such a sub-metric resolution, land cover and land use, either standing with vegetation or anthropized, are well recognized by photointerpretation. Satellite data thus deliver exhaustive views and knowledge of a landscape, thanks to the spatial dimension, along with information on the surface composition by means of the reflectance measurement in several wavebands. These radiometric data are provided in the visible and near-

infrared domains, and thus allow the physical discrimination of landscape units, various vegetation densities, and even some vegetation types. In addition, it is possible to derive texture information characterizing the land structure and organization. In this study, we processed Pleiades data (©CNES 2018, © Airbus DS 2018) acquired with less than 5 % cloud cover in September 2018, covering about 9.6 km from 49°6'19.8" to 49°11'43.5" East, and 8.7 km from 17°25'15.3" to 17°30'1.2" South. The data were delivered in an orthorectified bundle format including, on one hand, a panchromatic image acquired at the spatial resolution of 0.5m/pixel, and covering the spectral range 480 – 830 nm, and, on the other hand, a multispectral set of four bands acquired at 2m/pixel and covering respectively the ranges 430 – 550nm (Blue), 490 – 610nm (Green), 600 – 720nm (Red), and 750 – 950nm (Near Infrared). In addition, we used the altimetric data collected in 2000 by the space shuttle Endeavour (STS-99) during the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), providing the Digital Terrain Model (DTM) at the spatial resolution of 30m/pixel (DOI : 10.5066/F7PR7TFT), to derive the altitude, slope, and exposure maps of the study area (Figure 4-3).

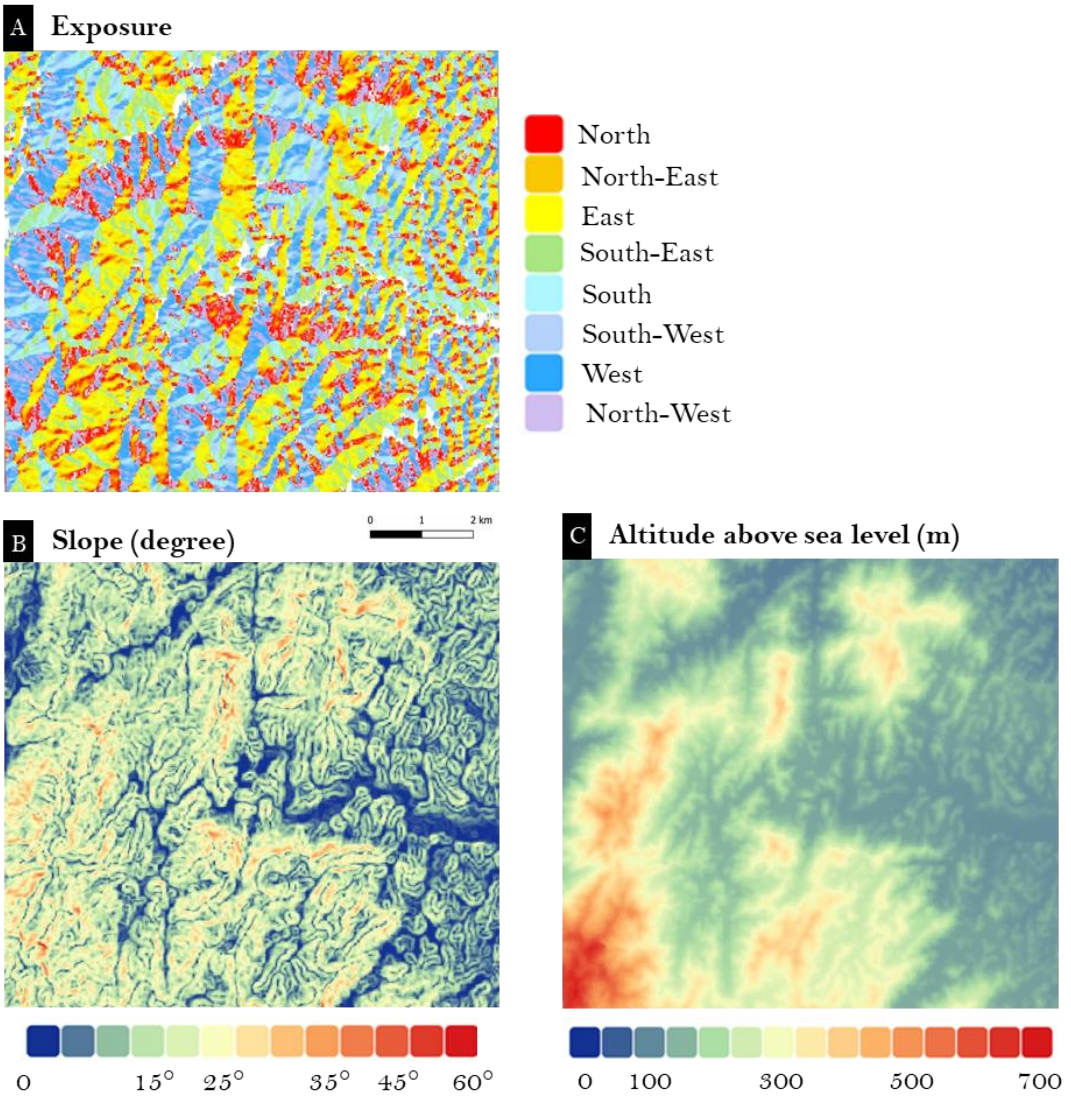


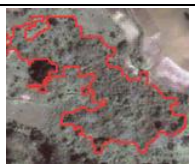

*Figure 4-3: Topographic maps of the study area derived from SRTM data: (A) altitude, (B) slopes and (C) slope exposures.*

### ♦Ground-truth data

A field survey was carried out in 2019 in order to identify the main types of land-cover and land-use present in the studied area. The objective was to inventory the different variants of agroforests, based on their density, diversity, and composition. It allowed us to determine a typology of the principal land-use types that characterizes the agronomical environment in this region, leading to the definition of thirteen classes, described in Table 4-1. Also, it helped to produce a ground-truth database, comprising of more than 500 field-points representing various land uses and land covers that were carefully geo-localized by means of the Global Positioning System (GPS) with spatial accuracy of 4 to 6 meters. These fields were integrated into a Geographical Information System (GIS) for digital processing included in the classification methodology. Afterwards, this field knowledge allowed us to photo-interpret the satellite image, and complete the ground-truth data to up to 1000 control points.

A subset of these have been used in the classification learning process while the rest served for the validation of the final map product.

*Table 4-1 : Description of the thirteen land-use classes. In this description, we use the term fallow not only to refer to the vegetation of land in a shifting cultivation cycle, but also to that of land that has been temporarily abandoned*

| | | |
|---|---|---|
| **1 Diversified agroforest**  High-density vegetation, composed of diversified cultivated and non-cultivated species, including trees of significant height and diameter, shrubs, and herbaceous vegetation. | **2 Introduced timber sp. plantation**  High-density vegetation dominated by an introduced timber species as *Acacia mangium*, *Grevillea* sp. or *Eucalyptus* sp. | **3 Clove monocrop**  Mature clove trees in dense plantation, with a closed canopy where interspacing is invisible. |
| **4 Diversified tree park**  Land with several woody species (clove trees, fruit trees, timber trees) in low density with interstitial herbaceous crops or vegetation. | **5 Low-diversified clove park**  Clove trees in low density with interstitial herbaceous crops or vegetation poorly diversified. | **6 Low-diversified woody fallow**  Shrubby and woody fallow vegetation, characterized by a low canopy and poorly diversified (e.g. *Bambusa* sp.). |
| **7 Diversified woody fallow**  Shrubby and woody fallow vegetation, characterized by a low canopy and highly diversified (e.g. *Ravenala madascarensis*, *Grevillea* sp, *Bambusa* sp., *Litsea glutinosa*, *Psidium cattleianum*). | **8 Bramble shrubby fallow**  Shrubby and herbaceous vegetation, poorly diversified and strongly invaded by *Rubus alceifolius* (also called giant bramble) or by bamboo. | **9 Diversified shrubby fallow**  Shrubby and herbaceous vegetation, highly diversified (e.g. *Ravenala madascarensis*, *Bambusa* sp, *Aframomum angustifolium*, *Imperata cylindrica*, *various ferns*). |
| **10 Annual crop, pasture, short vegetation**  | **11 Built up area, road, other bare soil** | **12 Rice field (paddy)**  |
| **13 Open water** | | |

### ♦Remote sensing land-use mapping

In order to produce an exhaustive map of the area, the satellite data were processed with semi-automatic algorithms supervised by the field knowledge. The expected classes being widely diverse in terms of vegetation density and heterogeneity, with some of them being difficult to discriminate either

spectrally or structurally, even at the submeter resolution, we chose to apply an Object Based Image Analysis (OBIA, Blaschke 2010) at different scales and with a hierarchic approach. An OBIA methodology can indeed take advantages of VHSR data by integrating the spatial configuration of ground elements, like small patches of pixels, into the classification process, considering the pixel in its context instead of an isolated item. Therefore, the object analyzed in the process is a homogeneous area regarding its class of land-cover, even if spatially heterogeneous. Thus, land covers that are spectrally similar but differently organized can be better discriminated.

OBIA first requires a segmentation, that means a partition of the image in objects, formed by a group of contiguous pixels sharing the same spectral and textural properties, while being constrained by shape, scale, and homogeneity criterions defined by the user. These objects are then classified, providing a first level of information. Multiple successive segmentation levels might then be generated, iteratively, each followed by its subsequent classification level, depending on the requirements of the processing. Those requirements depend on the complexity of the area to be mapped and/or its nomenclature. By using this approach, classes of little diversity can be sharply discriminated and discarded from the more complex classes, while particularly diversified classes can be coarsely discriminated at one level and detailed in underlying levels.

For this study, the satellite data were processed by using the eCognition (®Trimble) software, in a stack compiling the multispectral (MS) and panchromatic (P) bands, along with the height textural indices based on the cooccurrence matrix calculation (Haralick et al. 1973) derived with ENVI (®L3HarrisTechnologiesInc.) software, all of them resampled at the same resolution as the panchromatic layer (0.5 m/pixel). As the first level of processing, we have segmented the whole image in small homogeneous objects of about 0.01 ha, and discriminated the vegetated areas from the other land covers (built up areas, bare soil, rice fields, and open water) by only thresholding the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI, Tucker 1979) and the Entropy and Mean textural indices. Then, the two classes "vegetation" and "others" were processed separately. Based on a second segmentation level applied only to the non-vegetation class, we classified the bare soil, built up areas, rice fields, and open water surfaces using a nearest neighbor algorithm supervised by samples belonging to the ground-truth database. Additional photointerpretation of rice-fields consolidated and completed this step. A third segmentation level was then focused on the vegetation class of the first level, creating plot-scale homogeneous objects of about 0.4 to 0.7ha. At this stage, four vegetation classes were discriminated on the basis of the data layers features without thematic interpretation, by means of a supervised nearest neighbor algorithm. These classes differ from each other both in their spectral nature (i.e. species composition) and in their textural properties (i.e. trees spatial organization and density). Finally, thanks to a fourth segmentation level, similar areas that serve the same function were classified, and combined within the same thematic class reporting to the dedicated land-use classes. At second, third, and fourth levels, ground-truth reference data were involved to select a set of learning samples for each class. A feature space optimization was then carried out to identify the features (i.e.

radiometric and texture metrics) that will best benefit to the nearest neighbor classification. Finally, the classification algorithm was trained on the selected samples, and applied on the entire scene. The detailed successively performed levels of processing are summarized in Appendix 1.

The validation of the classification products was held with the support of the reference base (ground-truth completed by photointerpretation). The three first segmentation levels were visually validated throughout the processing software. At the final level, reference data were used to compute a confusion matrix and subsequent statistics (Table 4-2) such as the user accuracy and the producer accuracy per class. The number of control points depends on the relative proportion of each class. The global precision of this classification is thus 75 %, and its Kappa index is 0.71. The lowest intraclass precision (54 %) stands in the woody vegetation land uses such as the diversified parks, while anthropized areas and herbaceous classes are recognized with very high precision (85 to 100 %). But globally the results are really good as referred to literature in remote sensing, even for the complicated woody crops. We were indeed able to discriminate different types of agroforestry systems based on their vegetal diversity and structure complexity, and to recognize clove crops. OpenStreetMap data (https://www.openstreetmap.org) also helped to validate anthropized areas and water delimitation, showing that rivers and buildings are even more completely mapped with our work, thanks to accurate photo-interpretation, while roads present some discontinuities mostly due to overlaying vegetation canopy, and to shadows. Roads vector was then completed by the OpenStreetMap sources. Finally, the global precision of the whole produced map reaches 80 %, which is highly reliable.

*Table 4-2 : Confusion matrix for the land-use automatic classification. Class numbers correspond to the classes defined at Table 4-1.*

| Class number | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6+7 | 8+9 | 10 | 11 | Total | User accuracy |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 154 | 7 | 3 | 5 | 1 | 19 | 4 | 0 | 0 | 193 | **0.80** |
| **2** | 16 | 52 | 1 | 1 | 0 | 10 | 0 | 1 | 0 | 81 | **0.64** |
| **3** | 34 | 12 | 99 | 1 | 3 | 15 | 2 | 0 | 0 | 166 | **0.60** |
| **4** | 6 | 0 | 6 | 69 | 7 | 24 | 9 | 11 | 0 | 132 | **0.52** |
| **5** | 7 | 1 | 6 | 32 | 44 | 25 | 7 | 3 | 0 | 125 | **0.35** |
| **6+7** | 15 | 7 | 3 | 15 | 3 | 255 | 43 | 7 | 0 | 348 | **0.73** |
| **8+9** | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 170 | 13 | 0 | 192 | **0.89** |
| **10** | 0 | 1 | 0 | 5 | 1 | 1 | 15 | 223 | 0 | 246 | **0.91** |
| **11** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 200 | 200 | **1.00** |
| **Total** | 233 | 80 | 118 | 128 | 59 | 357 | 250 | 258 | 200 | 1683 | |
| **Producer accuracy** | **0.66** | **0.65** | **0.84** | **0.54** | **0.75** | **0.71** | **0.68** | **0.86** | **1.00** | | |

This land-use map produced at 0.50 m/pixel spatial resolution (https://doi.org/10.18167/DVN1/KDNOV4) is thus a relevant tool to (i) qualitatively analyze the location and the spatial distribution of the different land uses throughout the study area and their arrangement with each other, and in relation to physical environment (Figure 4-3) and (ii)

quantitatively measure landscape metrics to discuss the physical, ecological, and human conditions for an agroforestry-based restoration.

### ♦Analysis of the conditions for an agroforestry-based restoration

The objectives of these analyses are, firstly, to define objectively landscape units characterized by a dominant land-use, and thus identify units rich in agroforestry. Secondly, qualitative and quantitative information are derived to address the ecological, physical and human dimensions of an agroforestry-based restoration.

Definition of the matrix zones

A major-land-use zoning was done by applying to the land-use map a statistical majority analysis with square sliding windows of 1.5 km by 1.5 km. This dimension was chosen in accordance to the average area of a village landscape (chapter 3: Mariel et al. Accepted) and in reference to the landscape definition in landscape ecology: "*a kilometer-wide area where a cluster of interacting stands or ecosystems is repeated in similar form*" (Forman and Godron 1981). The process returns, for a given pixel, the class that has the largest number of pixels included inside its 1,5 km x 1,5 km square vicinity. If there exists any spatial coherence in the studied area, the resulting map gives a zoning of the landscape based on the major land-use in force, also called the local landscape matrix (Gökyer 2013). This kind of analysis helps the design of specific landscape units (called matrix zones) that could structure the study area. In this line of thought, a matrix zone can be considered as a spatial unit with a particular structure (composition and configuration of the different land-uses) and characterized by a set of meta-properties such as diversity, heterogeneity and order (Van Eetvelde and Antrop 2009), which are known to affect the distribution of species (Fahrig et al. 2011).

Analysis of the physical dimension of the restoration

The physical dimension of the restoration was studied by characterizing the topographic drivers of the land-use types distribution throughout the study area. We used three factors related to the landscape toposequence: the altitude, the slope and the exposure (Figure 4-3). The altitude and the slope were intended to address the issue related to the erosion, and the exposure aimed to address the issue of cyclone-related risks.

Analysis of the ecological and human dimensions of the restoration

All the analyses presented below were conducted with CHLOE software (Bousssard and Baudry 2017). This software was developed to calculate several landscape heterogeneity metrics reflecting the internal structure in terms of composition and configuration. The different aspects of heterogeneity are based on the Shannon entropy (Shannon 1948). CHLOE software performs analyses at the pixel level by considering the type of land-use that characterizes it as well as the surrounding pixels (also characterized by a land-use type).

We described the heterogeneity of each matrix zone by calculating (i) the diversity of land-uses (SHDI) broadly used in ecology for species diversity (Marcon 2015), (ii) the global heterogeneity (HET), (iii) the heterogeneity resulting from the landscape configuration (HET-frag) and (iv) the heterogeneity resulting from the landscape composition (HET-agg). The diversity corresponds to the Shannon index: $SHDI = -\Sigma p(i)*\log(p(i))$, with i a pixel characterized by a land-use type. The global heterogeneity metric (HET) is based on the Shannon diversity index and thus derived from the equation: $HET = -\Sigma p(i, j)*\log(p(i,j))$, with i and j being two adjacent pixels in the map. The heterogeneity resulting from the landscape structure (HET-frag) is calculated by considering only the couples (i, j) of pixels of different land-use types, i.e. with $i \neq j$. The heterogeneity resulting from the landscape composition (HET-agg) considers only the couples (j, j) of pixels of same land-use type, i.e. with i=j. Then, we compared the metrics obtained for each matrix zone to each other and in relation to the metrics that characterized the agroforestry matrix. As these calculations consider all types of land-uses, we can analyze the interactions between land-uses corresponding to human infrastructures, other cropping systems and the different kind of fallow vegetation.

To better characterize the implantation of agroforestry within the study area, we measured the size of patches formed by adjacent pixels belonging to the same land-use by the sides and diagonals, and this for each land-use (excepted "open water" and "build-up area"). We also calculated the proportion of interfaces between four size classes of diversified agroforests (<0.5 ha, 0.5-1 ha, 1-4 ha, 4< ha) with the other land-uses. For these two calculations, we combined the two types of parks (named P), the two types of woody fallow (named W.F) and the two types of shrubby fallow (named S.F). We used the CLUSTER module of CHLOE, and the QUEEN option. This analysis aimed at describing how the agroforestry patches are distributed in the landscape according to the size of their surface and in relation with the other cropping systems, and discussing the influence of plot size on the landscape structure and heterogeneity.

## 3. RESULTS

### ♦Description of the land-use composition

Globally, there is a huge diversity of land uses in the study area, with 11 types corresponding to cultivated or non-cultivated vegetation, in proportions ranging from 3 to 18 % (Figure 4-4.A and C). Tree-based plantations (considering all types of practices) cover 29 % of the study area, followed by annual crops/pasture/short vegetation (15,5 %) and paddy rice fields (8 %). Considering only tree-based plantations, diversified agroforests are clearly the main cropping system (13 %) compared to the two types of tree parks (8 %), the clove monocrops (5 %) and the introduced timber species plantations (6 %). The different kind of fallow vegetation are also in variable proportions, with the diversified woody fallow that covers a higher proportion of the study area (18,5 %) than the low-diversified woody fallow (11 %) and the shrubby fallow (14 %). More than 46 % of the region is left uncropped.

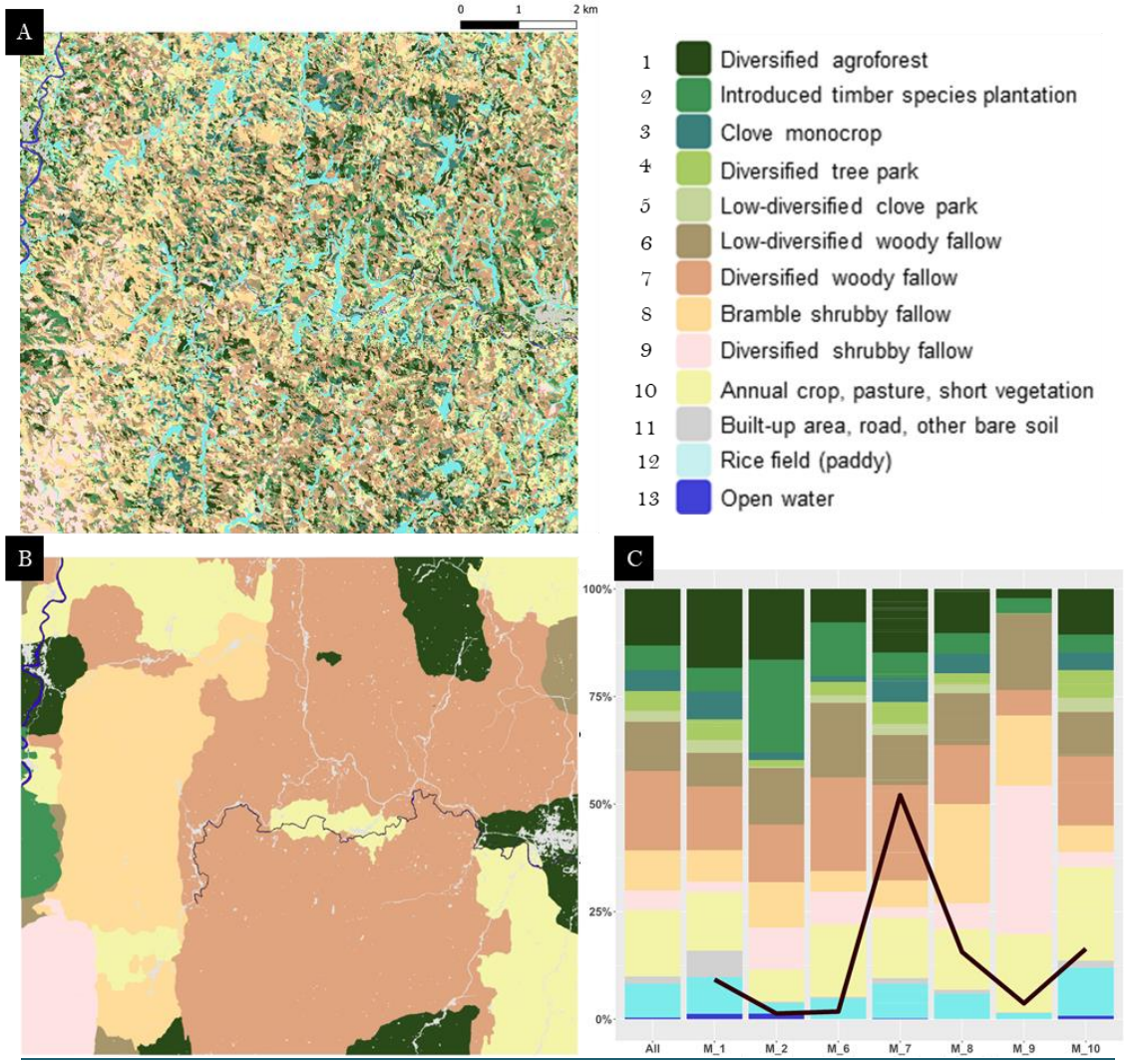



*Figure 4-4 : (A) Thematic land-use maps derived from Pleiades satellite data, and produced by multispectral image classification. (B) Landscape matrix map, produced by majority analysis of the land-use map. The number associated to each matrix zone corresponds to the land-use class number. Each matrix zone was named as following: 1= agroforest matrix, 2 = timber matrix, 6 = poor-woody-fallow matrix, 7 = rich-woody-fallow matrix, 8 = bramble-fallow matrix, 9 = rich-shrubby-fallow matrix and 10 = herbaceous matrix. (C) Proportion of the different land-use classes over the study area (All) and each matrix zone.*

The majority analysis shows that the different land-uses are not equally distributed throughout the study area (Figure 4-4.B) and among the 11 types of cultivated or non-cultivated land-uses. The two types of parks and clove monocrops do not define a matrix zone. The bramble-shrubby-fallows matrix cover a large area at the West of the landscape (15,6 %), the rich-woody-fallow matrix dominates half of the landscape in the center (52 %) and the poor-woody-fallow matrix covers two small areas (1,8 % in total) respectively at South and at North-East of the area of study. Diversified agroforests define four main matrix zones, whose two of them correspond to the location of the main towns of the study area (Vavatenina to the East and Ambohibe to the West). The total area covered by the agroforest matrix represents 9,2 %. The timber matrix covers only a small area located in the West (1,3 %). Annual crops, pasture and short vegetation (herbaceous matrix) dominate three small

matrix zones (16,4 % in total), respectively at the North-West, North-East and South-East of the study area.

The distribution of the different land-use types is represented Figure 4-4.B for the seven types of landscape matrix zones. It shows that, even if each land-use type is found everywhere in various proportions, they are not equally distributed in the area. For instance, the proportions of rice fields, annual crops/pasture and the both woody fallows do not vary a lot from one matrix zone to another. This indicates that these land-uses are a kind of constant throughout the landscape, playing a minor role in its organization and dynamics. The two types of parks and clove monocrops are not present on the rich-shrubby-fallow matrix and very few in the -timber matrix. In the other landscape matrix zones, they are present in low proportions. Diversified agroforests are present in each landscape matrix zone and in higher proportion.

### ♦Description of the spatial distribution of the land-use types in relation to the topography

The spatial distribution of the different land-uses is not random, but strongly driven by the topographic conditions (Figure 4-5). Globally, tree-based plantations (diversified agroforests, tree parks, and clove monocrops, plantations) are mainly implanted at an altitude between 100 m and 400 m, are located on slopes less than 40°, on slopes that are less exposed to cyclones (i.e. exposed in the southern, south-western, and western slopes). If we describe in more details, we observe that the two types of combined parks (diversified and low-diversified) are in constant proportions whatever the exposure, but they are absent or almost on slopes above 40° and at an altitude above 350 m. The clove monocrops are mainly distributed on slopes unexposed, less than 40° and above 350 m. The diversified agroforests are rare in exposed slopes, they are present on slope above 40° and at an altitude between 350 m and 500 m in higher proportions than parks and clove monocrops. Compared to parks, agroforests and clove monocrops, the timber plantations are present at altitude above 500 m. Concerning woody fallows, both diversified and low diversified types cover in relatively constant proportions the slopes whatever their exposure, but the diversified woody fallow is less present on slopes above 40° and at an altitude above 400 m, while the low-diversified woody fallow is present in a substantial proportion. Concerning annual crops and pasture, we observe that they cover in relatively constant proportion all types of altitude and slopes (excepted slopes above 50°). The paddy rice fields are mainly located on the flat, i.e. in the bottom of the valleys, but there are some fields at the bottom of hills with low slopes. Paddy rice fields are scattered throughout the area with linear structures departing from the river. For the two shrubby fallows, we observe that when the proportions of tree plantations began significantly to decrease at an altitude of 300 m, the proportion of diversified

shrubby fallow increases; and on slopes above 20°, the proportion of *Rubus alceifolius* dominated fallows increase.

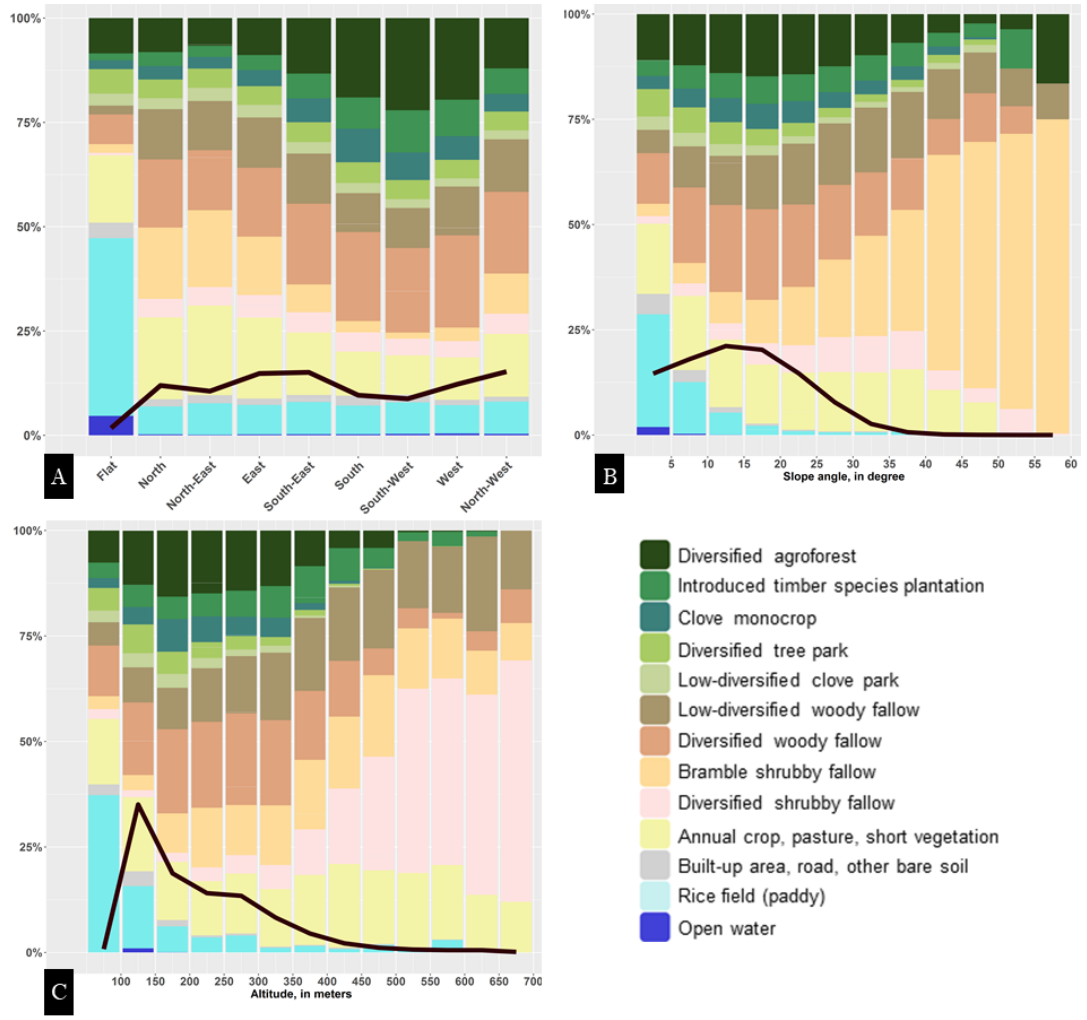



*Figure 4-5: Land-use distribution in the study area depending on (A) the exposure, (B) the slope and (C) the altitude. The black line corresponds to the proportion of the total surface in the given interval.*

### ♦Characterization of the landscape heterogeneity

In ecology, heterogenous landscapes are composed of patches of different types (Burel and Baudry 2005, Fahrig et al. 2011) and their heterogeneity has two components: the diversity of the types of patches (composition) and the diversity of the spatial arrangement of these patches (configuration).

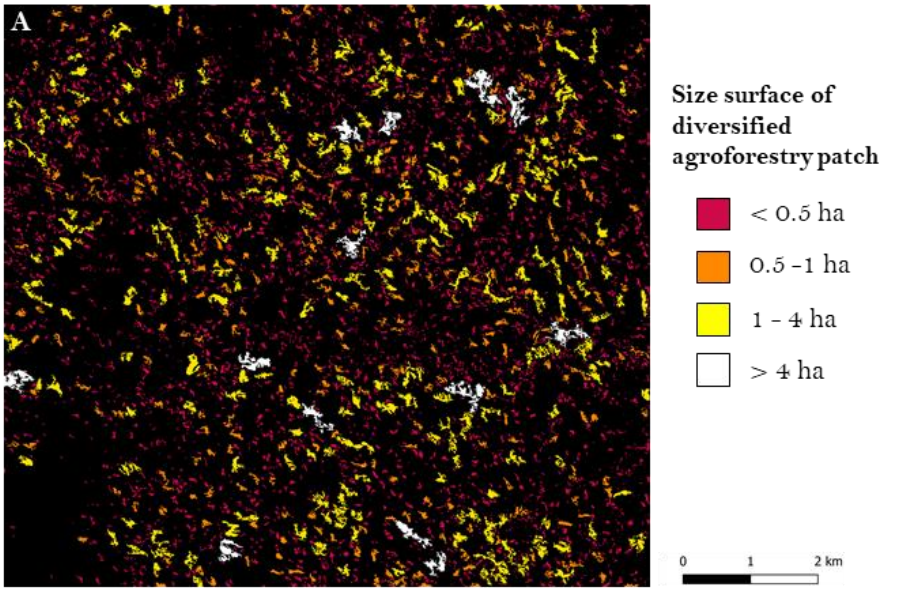
The value of SHDI (Shannon Diversity Index) for the whole study area is higher than in any of matrix zones (Table 4-3). This means that each matrix zone has less types of components than the overall landscape or that a few land-use types are more frequent than at the whole landscape level. We observed the same pattern for heterogeneity metrics. Indeed, the majority analysis gives an extra weight to composition, by construction, as it delimits zones based on their dominant land-use type. However, four matrix zones (2: timber, 6: poor woody fallow, 9: rich shrubby fallow, 10: herbaceous)

have a lower global heterogeneity (HET) than the others. Considering the ratios HET-frag/HET-agg that we calculated for the study area and for each matrix zone, we show that the high heterogeneity of the rich-woody-fallow matrix as compared to the other matrix zones is rather due to its configuration than to its composition. Compared to the other two heterogenous matrix zones (rich-woody-fallow matrix and bramble-fallow matrix), the agroforestry matrix has a lower diversity of land-use types (respectively SHDI = 1.51, 0.64, 0.44) and a lower heterogeneity (respectively HET= 1.94, 0.76, 0.51) but its ratio HET-frag/HET-agg shows that the landscape configuration contributes in the same way in the heterogeneity than for the bramble-fallow matrix.

*Table 4-3: Heterogeneity metrics inside the different landscape matrix zones and the overall study area. SHDI corresponds to the diversity Shannon index. HET represents the global heterogeneity, HET-agg the heterogeneity only due to land-uses of same type, and HET-frag the heterogeneity only due to land-uses of different types.*

| | SHDI | HET | HET-agg | HET-frag | HET frag/agg |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 : agroforest matrix | **0.44** | **0.51** | **0.36** | **0.15** | **42 %** |
| 2 : timber matrix | 0.08 | 0.09 | 0.07 | 0.02 | 29 % |
| 6 : poor-woody-fallow matrix | 0.10 | 0.12 | 0.08 | 0.03 | 38 % |
| 7 : rich-woody-fallow matrix | **1.51** | **1.94** | **1.27** | **0.66** | **52 %** |
| 8 : bramble-fallow matrix | **0.64** | **0.76** | **0.53** | **0.22** | **42 %** |
| 9 : rich-shrubby-fallow matrix | 0.19 | 0.21 | 0.16 | 0.05 | 31 % |
| 10 : herbaceous matrix | 0.30 | 0.30 | 0.30 | <0.01 | · |
| Study area | **2.31** | **3.13** | **2.00** | **1.13** | **57 %** |

Calculating patch size for each land use provides a better understanding of the landscape heterogeneity due to the configuration. Indeed, the size of the patches influences the abundance and the diversity of the interfaces and thus the landscape heterogeneity (Fahrig et al. 2011). This calculation also provides insight into the size of the surface that the farmers can manage and how they manage agroforestry lands relative to the other land uses. We found that whatever the type of land-use, most patches present area surface inferior to 0.5 ha (e.g. agroforests: 50 %, timber plantations: 41 %, clove monocrops: 41 %, two types of parks: 65 %) (Figure 4-6, Appendix 2). No patch above 8 ha is observed in the case of tree-based plantations. The map presented in the Figure 4-6.A shows that the distribution of the four classes of patch surface of diversified agroforests is heterogenous in the area. The proportions of interfaces calculated (Figure 4-6.B) show that agroforestry patches are globally mainly at the interface with woody fallows (between 42 % and 44 %) and less are at the interface with shrubby fallows, annual crop/pasture, build-up area and paddy rice field. Small patches of agroforests (<0.5 and 0.5-1 ha) are rather at the interface of parks (15 % and 14 % respectively) and the patches with a size above 1 ha are more evenly next to the others types of land-uses. Globally, the different patch sizes we calculated are an argument to support the fact that the landscape configuration plays strongly on the heterogeneity.




| B | Tsp.P | C.M | P | W.F | S.F | Ac.P.Sv | B.A | P.R.F |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **<0.5 ha** | 9% | 8% | 15% | 42% | 8% | 11% | 2% | 4% |
| **0.5-1 ha** | 10% | 8% | 14% | 45% | 7% | 10% | 2% | 4% |
| **1-4 ha** | 13% | 10% | 12% | 44% | 7% | 9% | 2% | 4% |
| **>4 ha** | 14% | 15% | 11% | 44% | 5% | 6% | 3% | 2% |

*Figure 4-6 : (A) Mapping of diversified agroforests patches according to their class of size surface throughout the study area. (B) Proportion of interfaces between the land-uses and diversified agroforestry patches according to their class of size. DA: Diversified Agroforests. Tsp.P: Timber species Plantations. C.M: Clove monocrops. P: the two types Parks (diversified and low-diversified). W.F: the two types of Woody Fallows (diversified and low-diversified). S.F: the two types of Shrubby Fallow (Bramble and diversified). Ac.P.Sv: Annual crops, Pasture, Short vegetation. P.F.F: Paddy Rice Field.*

## 4. DISCUSSION

Our study provides a comprehensive overview of in which way small-scale agriculture have shaped a landscape mosaic. It highlights heterogeneous patterns of land-uses with variable landscape heterogeneity, the effect of location and the physical environment on farmers' strategies of land-use management. These results have several implications for an agroforestry-based restoration of degraded tropical landscapes.

### ♦ Possible restoration conditions

Agroforestry lands were found in the whole study area and agroforestry dynamics observed at the village level extend beyond (chapter 3: Mariel et al. Accepted). Our study confirms the transition from slash and burn agriculture for food production to diversification strategies that habe been described in other tropical forested regions (Aumeeruddy and Sansonnens 1994, Pollini 2009, Hariyadi and Ticktin 2012, Nath et al. 2020). We found that the forested patches still present in 1966 disappeared (Figure 4-2) (Dandoy, 1973) and that bamboo dominated fallows (i.e. low diversified woody fallow) turned into different types of cropping systems among which diversified cash-crop

agroforests (e.g. clove, vanilla, coffee) (Mariel et al. 2021a). In Northern Madagascar, the cultivation of vanilla and clove in agroforests has long been identified as a way to development cash crops and maintain high level of biodiversity (Gezon and Freed 1999). The low proportion of clove monocrops we found in Vavatenina landscapes indicates that despite this practice was strongly pushed by the colonial rural development programs, the farmers currently rather develop clove-based diversified agroforests than monocrops. However, we highlight that agroforestry practices are not equally distributed in the area, defining zones where diversified agroforests are dominant and other where they are almost absent.

Indeed, we observe a higher proportion of diversified agroforests around the two main towns of the study area (Vavatenina and Ambohibe). This can be partly related to the important number of home-gardens located around the habitats (Mariel et al. 2021a) but also to the diversification farmer strategies in more and more reduced field size due to successive inheritance. Unlike diversified agroforests, the two types of parks (diversified and low-diversified) are less present in the whole study area. This management of parks is not much described in the literature on Madagascar. The study conducted by Arimalala et al. (2019) on clove-based cropping systems describes that clove parks would result from former dense clove plantations that have lost trees due to cyclones, cutting for wood or death (natural death or caused by the clove tree miner *Chrysotypus mabilianum*, Dubois and Ranaivosoa 1966). However, our results suggest that clove parks would also be a transitional stage before diversified larger agroforest. Indeed, our field observations showed first that some farmers' plots include both park and diversified agroforestry areas that may therefore correspond to sub-units within clove-based agroforests (Mariel et al. 2021a). Second, they showed that some parks were planted with young trees (not detected by remote sensing analysis), suggesting that they will become more diversified. Our results support these field observations and the idea that parks are a first step forward diversified agroforest. Indeed, our measures of the patch area are in line with these observations as they show that small-sized agroforests (0.5 and <1 ha) are mainly at the interface with parks (mainly 0.1 ha in size) and the surfaces measured are comparable to the surface of sub-units that farmers define within their plots, measured in a previous study (min = 0.03 ha/max = 0.87 ha) (Mariel et al. 2021a). Based on this observation, we hence expect that the proportion of agroforestry in the landscape will increase in the future. These results also indicate that clove parks should be considered as a possible and recognized first stage in the perspective of landscape restoration based on agroforestry. For this purpose, studies are needed to identify and document the different possible stages according to agroforest types (Vieira et al. 2009).

By describing the interfaces between diversified agroforests and the other land-use types, we also underline that agroforests larger than 0.5 ha are mainly contiguous to low-diversified woody fallow. In the current context of agricultural expansion partly related to population growth, this result raises the question of the future of this fallow land. In other regions of Madagascar, the conversion of fallow from *tavy* into clove or vanilla plantations appears to meet the needs of both local populations

(Martin et al. 2020, Osen et al. 2021) and biodiversity erosion degradation (Llopis et al. 2021). Indeed, Osen et al. (2021) argued that fallow-derived agroforests have the potential to "*increase canopy cover and connectivity at the landscape scale*". Therefore, the conversion of low-diversified fallows in agroforests may contribute to the restoration of the ecological and economic values of Vavatenina landscapes.

### ♦Implications for the recovery of biodiversity

Madagascar is known for its huge diversity of animal and plant species of which nearly 90 % are endemic (Goodman and Benstead 2005). Deforestation due to human activities has strongly contributed to the erosion of this biodiversity. The practice of slash-and-burn cultivation is one of the main causes of the decrease in forest cover by more than 40 % between 1953 and 2014 (Vieilledent et al. 2018). Vavatenina area was not spared by deforestation (Figure 4-2). However, the landscape composition and configuration changes may suggest the evolution toward more forested and thus species rich landscapes.

Several studies highlight the plant species richness of complex agroforests in the North-East coast of Madagascar (Arimalala et al. 2019, Mariel et al. 2021a, Danthu et al. 2022). Most of this diversity is due to introduced and cultivated species, but numerous native species are maintained by farmers for their traditional uses or symbolic value (Martin et al., 2009; Rafidison et al., 2021). This "*melting-pot*" of biodiversity managed by the smallholders contributes to their sustainability (Kull et al. 2013). The different types of fallows were also described to be host of various useful plant species (Carrière et al. 2005). Different studies analyzed animal biodiversity in Malagasy agricultural landscapes, like bird and bat species (Martin et al. 2009; Picot et al. 2007) or lemur species in cacao agroforests associating native and exotic shade species (Webber et al. 2020). These studies indicate the potential of agricultural landscape mosaics mixing agroforests and fallows to recover biodiversity, and the role of exotic species in biodiversity restoration (Gérard et al. 2015). For this purpose, in-depth species inventories of plants and animals must be achieved to better evaluate the existing biodiversity depending on landscape composition and configuration, and also the type of biodiversity that can be recovered in such landscapes.

Despite the potential role of introduced species in biodiversity restoration (Gérard et al. 2015), potential invasive species have to be managed. We highlighted two invasive plants species that dominate fallow vegetations: bamboos and giant bramble (*Rubus alceifolius*). In some tropical regions, bamboos prevent the development of seedlings and young trees (Lacerda et al. 2020). In Madagascar, the various species of bamboos provide woody materials that are daily used for multipurpose: transport of goods, construction of fences, floors and barriers to prevent the entry of zebus into the plots (Mariel et al. 2021a, Danthu et al. 2022). To mitigate the negative impacts of bamboos on crops while benefiting of their usefulness, some farmers spatially restrain bamboos at the edge of their plots (Mariel et al. 2021a). However, we do not know how they manage this, and the effort it represents. Concerning giant bramble, this species is described having negative impacts on the avifaune (Reynolds and Symes

2013) and being sensitive to weather conditions (Ndlovu et al. 2018), that suggests the management of this invasive species may be necessary but targeted to lands suitable to its establishment and growth (i.e. low elevation, warm and moist lands). In our case, all the studied landscape offers suitable conditions but the management may firstly target the giant bramble matrix we identified. However, we know little about what this species implies for farmers in terms of management in their plots and in the landscape. Therefore, the regulation of these introduced species for the expected biodiversity recovery can be addressed if in-depth works are conducted to learn more their impacts on the environmental conditions (e.g. water and soil fertility), and how farmers perceive and manage their presence in plots and landscapes (Kull et al. 2014).

Vavatenina landscapes are characterized by a strong heterogeneity resulting from the diversity of land-uses and their spatial configuration. Studies have shown that such an heterogeneity in agricultural landscapes has positive effects on their functioning and sustainability by enhancing the biodiversity (Fischer et al. 2006, Clough et al. 2009, Martin et al. 2012). Among the different land-uses in Vavatenina landscapes, the diversified agroforests, timber plantations and the two woody fallows are potential habitats for animal and plants species. For instance, the presence of small patches of trees can play a complementary or supplementary role to those of the non-anthropic habitats (e.g. forests) and the birds come to find resources there (Martin et al. 2009; Velásquez-Valencia et al. 2019). In our case, this function may be provided by combining agroforests with woody fallows evolving into forest patches. Besides, the types of trees and their management are also decisive for the insects biodiversity (ants and beetles) in agroforestry landscapes (Bos et al. 2007, Jha and Vandermeer 2010). Such species and land management strategies imply firstly, a wide adoption of agroforestry practices with suitable trees species and, secondly, the conservation of non-cultivated lands as woody fallows. Thus, we suggest to document the barriers which prevent agroforestry establishment and increase woody fallow deforestation (Shennan-Farpón et al. 2022).

The heterogeneity of the Vavatenina landscapes also results from land-sharing that characterized generally small-scale agriculture (Ricciardi et al. 2018). In comparison to land sparing, land sharing is pointed out as an agricultural landscape management that shape a connected mosaic in favour of biodiversity restoration (Barral et al. 2015, Duarte et al. 2018, Lo and Laumonier 2019). Land sharing at small landscape level leads to the fragmentation of space in favor of biodiversity and some ecological functions, such as pollination (Brüning et al. 2018). In the case of Vavatenina landscapes, the heterogeneity linked to fragmentation also seems to be constructed with local practices of species spatial organization that lead to the definition of homogeneous sub-units within complex and diversified agroforests. This observation argues to better characterize these types of spatial species organization practices in order to base a restoration on agroforestry practices in favor of heterogeneity.

### ♦Implications for the restoration of soil fertility

Globally, the hills of the Vavatenina landscapes are characterized by moderately steep slopes (< 30°) whose erosion can be reduced by the presence of trees (Hillbrand et al. 2017, Rajbanshi and Bhattacharya 2020). Limiting erosion is a crucial issue for the sustainable land management to avoid soil degradation and fertility loss (U.N.C.C.D 2019). Here, it represents an important challenge in some parts of the study areas were shrubby fallow and annual crops/pasture are dominating on steep slopes (>30°). As recommended in other study (Brüning et al. 2018), the conversion of herbaceous fallow and pasture located on the steeper slopes is an option limiting soil erosion. If the development of agroforestry practices appears to be the most appropriate option, we need to understand why some parts of the study area (South-West) have a lower proportion of agroforests (Shennan-Farpón et al. 2022).

The recovery of soil fertility also implies the management of tree diversity and manure from livestock (Hillbrand et al. 2017). At the cropping system scale, if trees have generally positive impacts on the fertility, the plantation of trees with specific characteristics can further enhance the fertility (Hillbrand et al. 2017). For instance, trees help to rebuild soil organic matter (Acharya and Kafle 2009, Cassart et al. 2020) and favor the diversity of soil microfauna (Pauli et al. 2012, Rodrigues et al. 2015), and the nitrogen-fixing trees bring nitrogenous to the soil. Restoring soil fertility at the cropping systems scale requires to identify trees that could provide these different functions. To rebuilt soil organic matter, previous studies suggest tree species as *Albizia stipulata* and *Albizia lebbeck* (Arimalala et al. 2019, Mariel et al. 2021a) but we recommend to conduct further trees inventories and farmers' survey of their knowlege to identify species that could fulfill the other functions

### ♦The implications for adapting to climate change

The spatial distribution of land-uses in relation to topographic factors shows that the major part of woody plantations (i.e. agroforests, timber plantations, clove monocrops and parks) is located on the South, South-West and West sides of hills. This corresponds to the less exposed slopes to cyclones, according to the cyclone's trajectories (Figure 4-1). This land pattern can result, in one hand, from the devastation of plantations caused by previous cyclones (e.g. Honorinina in 1986, Bonita in 1996 and Ivan in 2008) and, in the other hand, from farmers' practices that promote less exposed slopes for perennial crops whenever it is possible. In the current context of climate changes, local practices that anticipate the negative impacts of violent climatic events have to be strongly considered in restoration actions. We suggest to conduct additional surveys with farmers to better understand their perceptions and knowledge about slope exposure effect on agriculture and also about the species and types of cropping systems that are the most resistant to cyclones. Linking this local knowledge with climate prediction models (Tadross et al. 2008, Vieilledent et al. 2016) will allow the identification of strategies that strengthen farmers' resilience. We also recommend to conduct large-scale surveys in

the study area to well document local observations of climate change impacts and the copping strategies to face these changes (Reyes-García et al. 2021).

## 5. CONCLUSION

We used a complex remote sensing method to characterize a fine-grained agricultural landscape resulting from small-scale agriculture and farmer-led agroforestry practices. Thanks to the mapping of the different land-uses, we provided a precise assessment of the agroforestry development in the Vavatenina area and its spatial distribution pattern. In particular, we highlighted the strong relationships between the land-use types and the topography. For the landscape ecology field of research, we showed that landscape metrics help the description of the interactions between the different land-use types management. Our study also raised the methodological challenge of characterizing more precisely the heterogeneity, especially identifying homogeneous units depending on both the composition and the configuration of the land-uses. Concerning the restoration of agricultural landscape formerly forested, this work can be seen as a starting point for further analysis to better assess the potential of agroforestry to restore ecological functions and the associated nature contributions to people. The recommendations we suggested support the idea of a restoration based on farmers practices, appropriated to local context and dynamics, and co-designed with the different stakeholders.

## 6. RÉSUMÉ ET TRANSITION

**Résumé :** L'analyse par télédétection d'une image satellite à haute résolution de la zone de Vavatenina fournit une carte précise des modes d'usage des terres permettant de mesurer la proportion relative de ces usages et de décrire leur répartition spatiale. Cette dernière est étroitement liée à la topographie, avec notamment un effet marqué de l'exposition des versants de *tanety* et de l'altitude :

- Les monocultures de girofliers et les agroforêts diversifiées sont quasi absentes au-delà de 400 m d'altitude et sur les pentes exposées aux cyclones ;
- Les différents types de jachère sont observés le long de toute la toposéquence et occupent les zones de *tanety* escarpées, en particulier les jarchère herbacées et arbustives abondantes en vigne marronne.

En termes de proportion, l'agroforesterie occupe une surface importante sur l'ensemble de la zone mais elle n'est pas répartie de manière homogène : certaines zones, comme les alentours des espaces urbanisés, sont plus riches en agroforêts diversifiées, alors que d'autres zones sont très peu agroforestières et se caractérisent par une proportion importante de cultures annuelles, de pâturage et/ou de végétation rase, ainsi que de jachères arbustives, à bambous et à vigne marronne. Cette répartition hétérogène pourrait s'expliquer par des dynamiques locales influencées par des facteurs plus ou moins en faveur de la diversification. Par ailleurs, ce travail montre que la forte hétérogénéité des paysages de Vavatenina est liée à la diversité des modes d'usage des terres et surtout à leur arrangement spatial. En effet, les différents usages du sol couvrent des patches de petite surface qui construisent une mosaïque très hétérogène.

Ces différents résultats permettent d'envisager des modalités de restauration des paysages dégradés via l'agroforesterie moyennant des travaux permettant de mieux connaître la biodiversité présente dans la zone ainsi que les facteurs humains qui influencent positivement l'adoption de cette pratique ou qui au contraire la contraignent.

**Transition :** Dans cette première partie, j'ai montré que le paysage de Vohibary, tout autant que ceux de la zone de Vavatenina, sont le siège de dynamiques agroforestières à l'origine de paysages en mosaïque. J'ai discuté des facteurs socio-économiques et politiques qui ont amené les paysan.nes à modifier et à adapter leurs stratégies vers des pratiques agroforestières multiformes et multifonctionnelles. Par ailleurs, l'étude de la structure des paysages en relation avec le milieu physique permet de discuter des implications d'une restauration reposant sur l'agroforesterie. En conclusion, les résultats de cette première partie permettent d'appuyer le fait que l'agrobiodiversité, gérée ici en agroforesterie, renforce la résilience des paysan.ne.s betsimisarakas et des paysages car elle est d'une part un moyen de s'adapter aux changements et elle représente d'autre part une voie possible pour restaurer certaines fonctionnalités des paysages et gérer durablement leurs ressources.

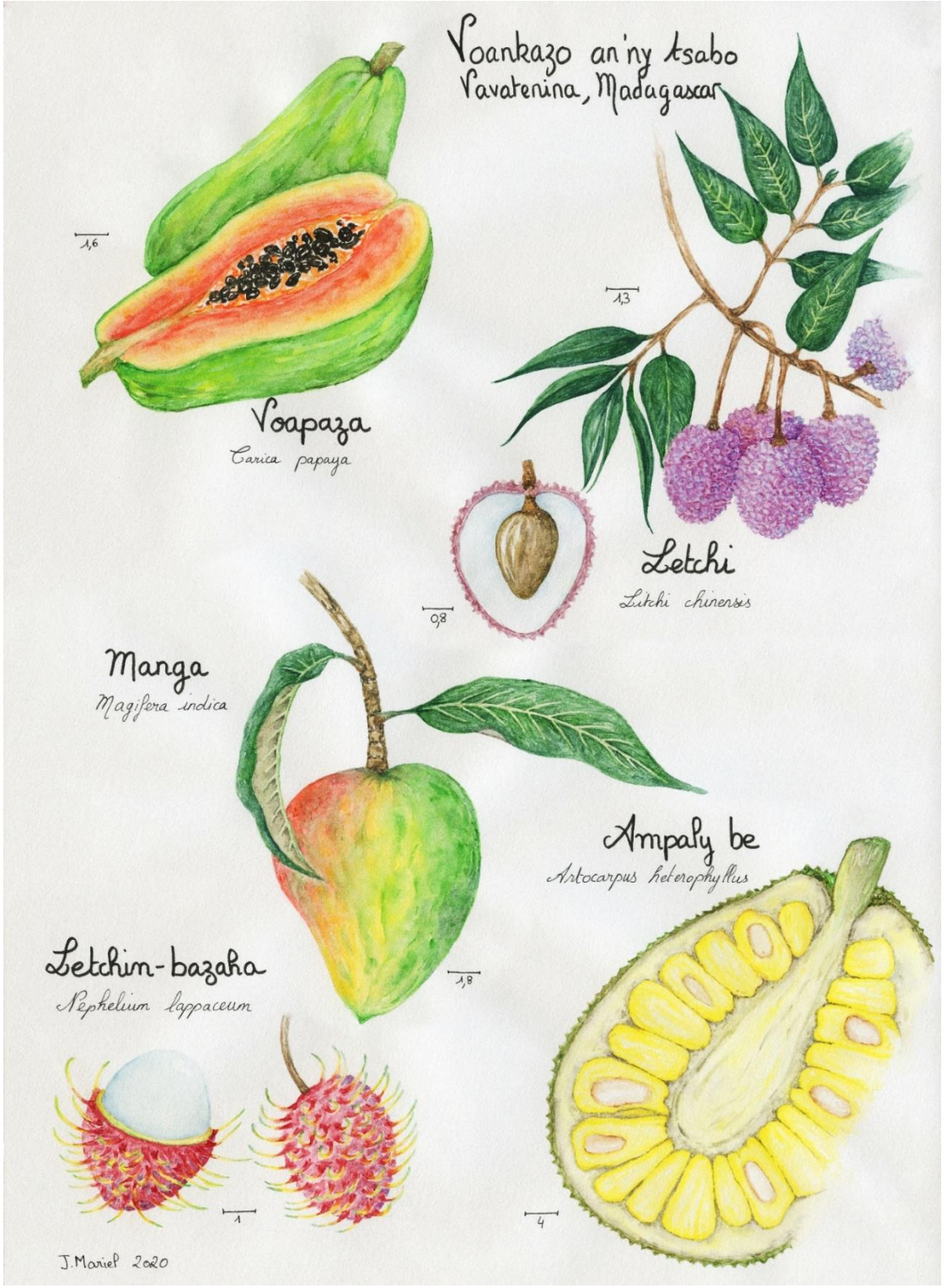
La manière dont les usages du sol ont été classifiés dans ces chapitres 3 et 4, en particulier ceux comportant des arbres, donne un aperçu de la diversité de composition et d'organisation de l'agrobiodiversité dans les parcelles des paysan.ne.s. Ces dernières semblent être plus ou moins diversifiées, riches en certaines espèces et catégories d'espèces, selon leur usage ou leur fonction dans la parcelle. La structure de ces parcelles montre aussi une variabilité dans la densité, avec certaines peu denses comme les parcs et d'autres très denses comme les agroforêts. Les dynamiques agroforestières caractérisées précédemment semblent donc reposer sur différentes manières de gérer l'agrobiodiversité en termes de composition et d'organisation dans l'espace et dans le temps. Cette deuxième partie cherche donc à caractériser ces différentes formes de gestion en s'intéressant aux connaissances

paysannes, théoriques et empiriques. En prenant le cas des agroforêts à girofliers et en faisant un focus sur le sol, le travail exposé dans la deuxième partie tentera de répondre aux questions suivantes :

- Comment la composition de l'agrobiodiversité des agroforêts à girofliers se caractérise-t-elle ? Et quels sont les facteurs qui influencent cette composition ?
- Comment l'agrobiodiversité est-elle organisée spatialement dans les parcelles ? Et quels sont les facteurs qui influencent cette organisation ?
- Comment le sol et sa fertilité ont-ils un effet sur la gestion de l'agrobiodiversité ?
- Sur quelles connaissances paysannes relatives à l'agrobiodiversité, au milieu biophysique et à leurs interactions mutuelles cette gestion repose-t-elle ?
- En quoi l'agrobiodiversité et les connaissances associées renforcent-elles la résilience des paysan.ne.s ?

# PARTIE II

## Les connaissances et les pratiques paysannes relatives à la gestion de l'agrobiodiversité dans les *tsabo*

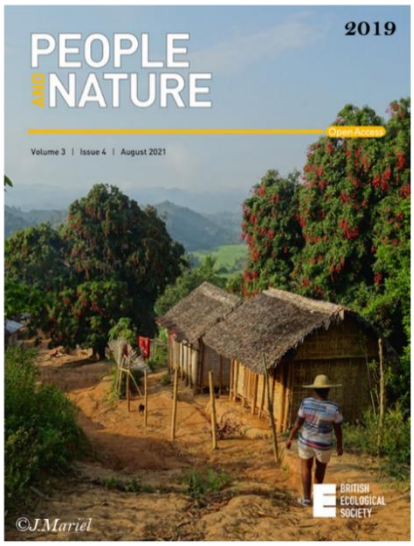


# Chapitre 5 |EXPLORING FARMERS' AGROBIODIVERSITY MANAGEMENT PRACTICES AND KNOWLEDGE IN CLOVE AGROFORESTS OF MADAGASCAR

Juliette MARIEL[1, 2]
Stéphanie M. CARRIERE[3]
Eric PENOT[4]
Pascal DANTHU[5]
Verohanitra RAFIDISON[6]
Vanesse LABEYRIE[1, 2]

*DOI : 10.1002/pan3.10238*
*Revue : Nature and People*




[1] *CIRAD, UMR SENS, 34398, Montpellier, France*
[2] *SENS, CIRAD, IRD, Univ Paul Valery Montpellier 3, Univ Montpellier, Montpellier, France*
[3] *SENS, IRD, CIRAD, Univ Paul Valery Montpellier 3, Univ Montpellier, Montpellier, France*
[4] *CIRAD/UMR Innovation, F-34398 Montpellier, France and Université de Montpellier, CIRAD, INRA, Montpellier SupAgro, Montpellier, France*
[5] *CIRAD/UPR HortSys, F-34398 Montpellier, France and UPR HortSys, Université de Montpellier, CIRAD, Montpellier, France*
[6] *Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo, Mention Biologie et Ecologie Végétales, BP 906, Antananarivo, Madagascar*

## 1. INTRODUCTION

Research on local ecological knowledge, defined as "*a cumulative body of knowledge, practice and belief, evolving by adaptive processes and handed down through generations by cultural transmission*" (Berkes and Usher 2000), shows that local communities have a specific and holistic understanding of their environment which contributes to their capacity to manage natural resources sustainably in an adaptive way to cope with the contingencies of environment and its spatial and temporal heterogeneity (Berkes et al. 2000, Folke 2004). Knowledge specific to plant species, their uses and their management practices, have been widely investigated because they concern socio-cultural, economic and environmental issues, such as biodiversity conservation (Garibaldi and Turner 2004, Rafidison et al. 2020), the adaptation of agriculture to climate change (Labeyrie et al. 2021b) or the food security of rural communities (Quave and Pieroni 2015). Multiscale studies have revealed the role of indigenous perceptions and beliefs in the way local communities control soil erosion and fertility, manage land use and forest regeneration in secondary fallows (Carrière 2002, Barrera-Bassols et al. 2006). All these studies emphasise how studying local knowledge of plants species helps understand human/nature

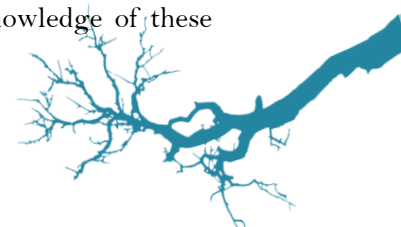
interactions, and why such knowledge play a critical role in the resilience of socio-ecological systems (Folke 2004, Congretel and Pinton 2020).

In agroecosystems, interactions between farmers and agrobiodiversity, i.e. the living organisms which contribute to agroecosystem functioning (Vandermeer and Perfecto 1995, Altieri 2002, Jackson et al. 2007), are a key dimension of human/nature interactions. In particular, it is widely acknowledged that agroecosystems in which farmers maintain a high level of plant diversity are more resilient to environmental and socio-economic perturbations (Jackson et al. 2010, Lin 2011, Isbell et al. 2017). The agroecology literature particularly emphasizes the importance of farmers' knowledge on how to organise the different plant species in space depending on the different ways species adapt to biophysical conditions, and how to associate plant species to account for their positive and negative interactions (Altieri 2002). However, these aspects of farmers/agrobiodiversity interactions are still poorly understood, although an improved understanding of farmers' knowledge of agrobiodiversity and their associated management practices is crucial if agricultural development initiatives are to match local realities and meet global change challenges (Altieri and Nicholls 2017, Labeyrie et al. 2021b).

Agroforestry systems are a particularly illustrative type of agrobiodiversity-based cropping system in the tropics and subtropics where local communities interact with the forest daily (Nair 1991). Agroforestry is defined as a system "*where woody perennials (trees, shrubs, palms, bamboos etc.) are deliberately used on the same land management unit as agricultural crops and/or animals, either in some form of spatial arrangement or temporal sequence*" (Zomer et al. 2014). Agroforestry is recognised as an agroecological practice which, under certain conditions, ensures more sustainable agricultural production in the tropics (Mercer 2004, Schroth et McNeely 2011). The positive effects of agroforestry on agricultural productivity (Pumariño et al. 2015), biodiversity (Bhagwat et al. 2008, Jose 2012) and the ecosystem services such practice provides (Jose 2009) contribute to the well-being of rural populations (Reed et al. 2017), increase resilience to climate change (Mbow et al. 2014b) and help restore degraded landscapes (Hillbrand et al., 2017). However, the literature on agroforestry systems rarely focusses on famers' knowledge of the ecological interactions that drive the spatial organisation of plant diversity, even though this domain of local knowledge is pivotal for efficient use of biophysical resources.

A few studies have described the spatial organisation of plant species, mainly in home-gardens (Méndez et al. 2001, Abebe et al. 2013) in relation to soil fertility (Junqueira 2015) or to altitude (Sahoo and Rocky 2015), but none of these studies takes farmers' knowledge into consideration as a way to understand the observed practices. Inversely, some studies on farmers' knowledge concern the interactions between plant species in relation to light and shade (Graefe et al. 2017, Smith Dumont et al. 2019), interactions between plants and invertebrates that influence soil fertility (Pauli et al., 2012), or the other types of ecological interactions that affect a range of ecosystem services (Cerdán et al., 2012; Ango et al., 2014; Rigal et al., 2018), but none analyses how farmers' knowledge of these





ecological interactions influences the way the farmers organise the different plant species in space. The lack of studies linking farmers' knowledge of ecological interactions with the spatial organisation of plant species is mainly due to methodological challenges, as what is required is the articulation of methods that properly collect farmers' perceptions of their environment and analyse them from a local perspective, with methods that allow the quantification and measurement patterns of organisation of different plant species.

The aim of the present study was to fill this research gap by investigating how practices used to organise plant agrobiodiversity in space relate to farmers' knowledge of interactions between plant species and with their biophysical environment, based on a case study of clove-based agroforests on the North-East coast of Madagascar ( Figure 5-1). An emic perspective, i.e. how farmers perceive their environment and their own actions related to it (Olivier de Sardan 1998), and different participatory methods and interviews were used to collect the data. First, the current diversity of plant species in agroforests and its functions were characterised along with the socio-cultural and economic drivers of this diversity. Second, the spatial organisation of plant species was analysed at two levels: species association within management sub-units, and species distribution in the overall agroforest plot. Third, ecological knowledge of farmers was documented by focusing on the positive and negative interactions between plant species and clove trees, the key species in these agroforests. Finally, it was discussed how farmers' knowledge of ecological process shapes plant diversity and its spatial organisation, as a function of the biophysical heterogeneity of the environment and the other plant species.

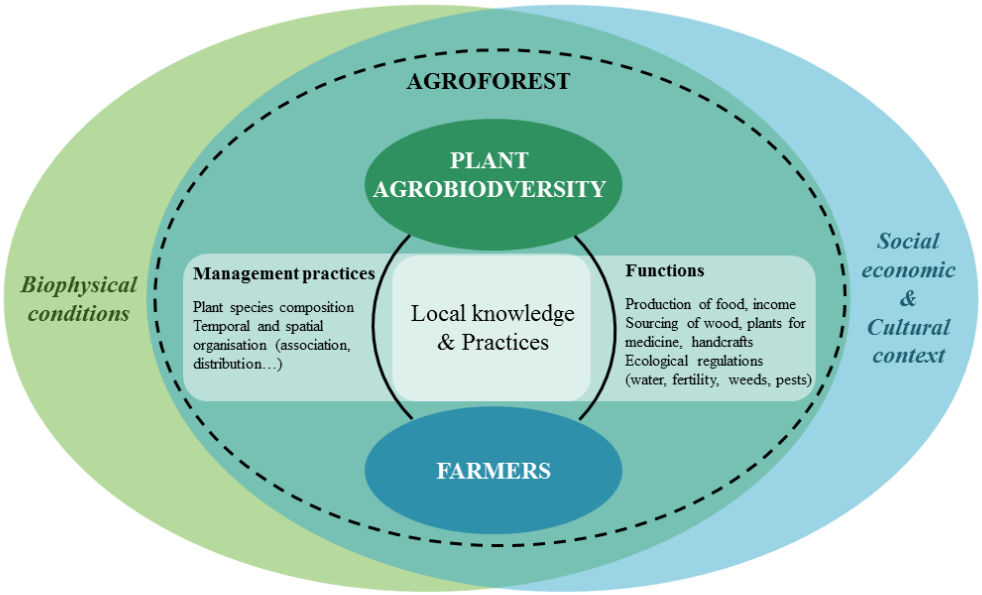



*Figure 5-1:Farmers-agrobiodiversity interactions in agroforests at the interface of socio-ecological dynamics. Social, economic and biophysical drivers play at different scales: farm, local, national, and global scales.*

## 2. MATERIAL AND METHODS

### ♦Study area

The study was carried out in the Vavatenina district of the Analanjirofo region on the north-east coast of Madagascar (Figure 5-2). This region experienced massive planting of cash crops, especially coffee trees and spicy plant species, widely imposed by the colonial government at the beginning of the 20th century to satisfy the needs of the French metropolis and achieve the colony's financial autonomy through a flourishing export-based agriculture (Isnard, 1951; Dandoy, 1973; Blanc-Pamard et Ruf 1992). Driven by economic factors, Analanjirofo region (literally "Forest of clove trees") gradually became the main zone for plantations of clove trees (*Syzygium aromaticum*) instead of the emblematic shifting rice cultivation called *tavy* (Dandoy 1973, Danthu et al. 2014). The two products provided by the clove tree, cloves and essential oil, have become major sources of income, and currently, many Malagasy people from the east coast base their food security strategy on both rice self-production and income from clove and other cash crops (Droy et al., 2017).

The surveys were conducted in the village of Vohibary located 50 km from the coast and 5 km from the town of Vavatenina, the district's administrative centre. The village was chosen because an in-depth agrarian diagnosis conducted in 1966 enabled a diachronic approach (Dandoy 1973). Most of the population belongs to the Betsimisaraka ethnic group. Between 1966 and 2019, the population of the village increased from 186 inhabitants (fewer than 50 households) to over 120 households, leading to the creation of a second hamlet on a hillside next to the original hamlet (Dandoy 1973, and survey data from 2016).

The climate of Analanjirofo is humid tropical with 3,600 mm of rainfall per year and an average annual temperature of 24 °C (Jury 2003). Local people differentiate three seasons: a cool wet winter season from June to August, a hot summer season the rest of the year, and a very wet period from December to March during which cyclones can occur. This coastal region is severely and regularly affected by cyclones, of which the last major ones were Honorinina (1986) Bonita (1996) and Ivan (2008).

The landscape is shaped by *tanety* (hills) rarely exceeding 400 m in height with slopes severely gullied by rainfall. The hydrographical network is structured around the main river, the Sahameloka, which is fed by numerous streams flowing from *tanety* springs and irrigates the rice-growing lowlands. Soil characteristics are closely correlated with topography. Soils of the lowlands are hydromorphic and accumulate organic and inorganic sediments. The *tanety* are occupied by eroded ferralitic soils with an overlying humus-bearing horizon (Dandoy, 1973). Along the topological gradient, the soil's texture, organic matter content and depth are variable and create heterogeneous environmental conditions for agriculture (Dandoy 1973; author's own measurements made with an auger).

The humid tropical climate enables the cultivation of many different perennial and annual crops. The farmers cultivate paddy rice in the valley lowlands and irrigable flat lands. On *tanety*, they cultivate many types of crops in association, within a system they called *tsabo*, including trees (clove, coffee, fruit trees, various palms, and others), lianas (vanilla, pepper) and herbaceous plants (sugarcane, cassava, maize, sweet potato, and others). The crops are mixed in several different ways, in space and time, with variable densities and levels of stratification. The main characteristics described by farmers for a cultivated land to be a *tsabo* are: the presence of trees, the presence of at least two different crop species and the presence of food species. The crop species are also associated with some naturally occurring plant species, i.e. non-cultivated species, including herbaceous and shrubby species, bamboo and palms that typically compose the local fallow vegetation (Rafidison et al. 2020). These *tsabo* correspond to the definition of agroforests given by Torquebiau (2000), i.e. agro-sylvicultural productive systems that combine commercial and subsistence products. One of the few in-depth studies of Analanjirofo agroforests concerns clove-based agroforests, i.e. clove-based *tsabo* (Arimalala et al. 2019).

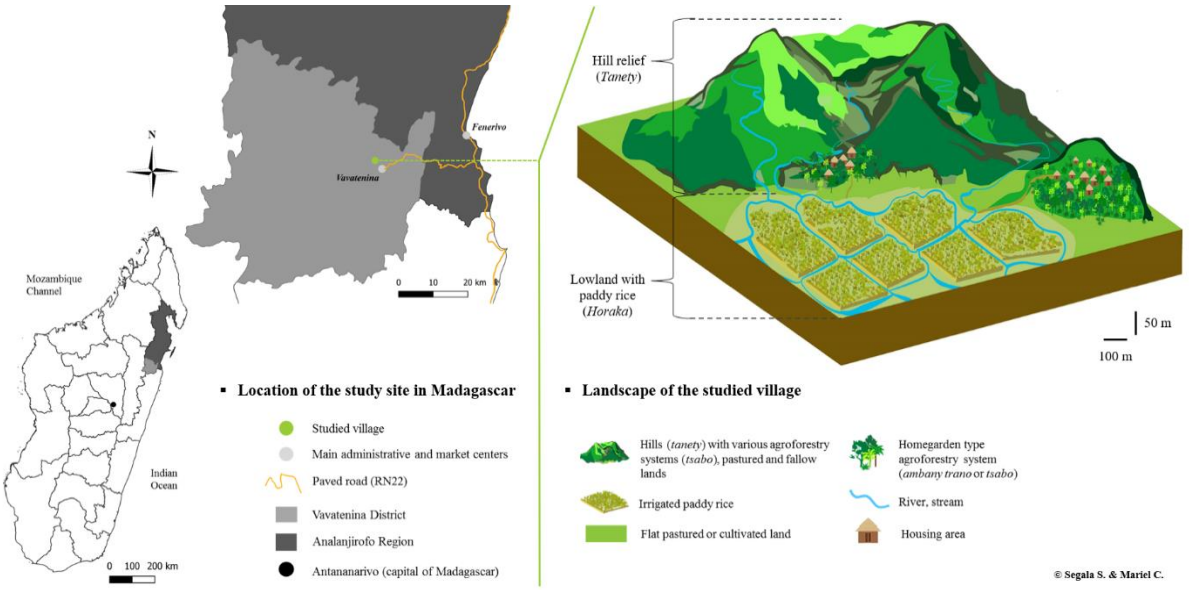



*Figure 5-2: Location of the study site in Madagascar and landscape mosaic at the village scale.*

### ♦Ethical approval

CIRAD ethics committee does not deliver ethical approval for research involving humans. To carry out the study, the Code of Ethics of the ISE (International Society of Ethnobiology) was followed. The work was conducted in collaboration with the University of Antananarivo in the frame of the "Forêt et Biodiversité à Madagascar" collaboration platform (CIRAD-FOFIFA-University). A research permit was issued by the Secretary General of the "Direction Générale de l'Environnement et des Forêts" before the study was undertaken. Before holding interviews in the village, a meeting was organised with the leader of the village and with the inhabitants to fully inform them of the

purpose of the research and how it would be conducted. The methodology and the type of data collected were explained to farmers so they knew what participating in the surveys would involve. The future use of the data and the expected benefits of the study were described and discussed with the inhabitants. Written consent was provided by the village leader. The farmers participated voluntarily and were free from coercion, they had the right to withdraw at any time. Before conducting the interviews, farmers gave their prior informed consent verbally. No activities were conducted without such consent. The involvement of an interpreter, a native of the study region, helped ensure that local rules and customs were respected as well as the rights and well-being of the farmers interviewed.

### ♦Data collection and analyses

Sampling methods

The semi-directive surveys on farmers' practices and knowledge were conducted in 2019, in a sample of 17 voluntary Betsimisaraka farmers corresponding to the household head (14 % of households of the village, with 1 woman and 16 men). The gender disparity was linked to the division of tasks between genders, men being responsible for planting trees in the *tsabo* in most cases. One *tsabo* per household was chosen based on the following criteria: the presence of clove trees to study only clove-based *tsabo*, the year the farmer began to work on its *tsabo* to cover different *tsabo* age categories, and the location in the landscape so that the sample of *tsabo* was distributed over the geographical area of the village.

Description of the agrobiodiversity from an emic perspective

To study the plant diversity of clove-based *tsabo*, the farmer being interviewed was asked to list on-site all the plant species present, using their common names. This list revealed which species the farmers considered to be important for them, in relation to their functions. It included planted species and spontaneously occurring species that are tolerated, or even encouraged by the farmers. The correspondence of common names with Latin names was established with the Betsimisaraka interpreter and Malagasy specialists from the University of Antananarivo. To document the functions of each species cited, two focus groups were organised: one in each village hamlet, and each included around 10 villagers, comprised two-thirds men and one-third women of different age groups.

Analyse of practices of agrobiodiversity spatial organisation

The spatial organisation of plant species in clove-based *tsabo* was investigated using a participatory method to draw a map of each *tsabo* visited, based on the method of (Méndez et al. 2001). These maps were used to describe two levels of spatial organisation of the species mentioned by the farmers: their overall patterns of organisation within *tsabo* (i.e. distribution and location according to the slope) and their association in sub-unit defined by the farmers, called micro-zone (Figure 5-3). The definition of micro-zone by Méndez (2001) was adapted to the local context and to farmers'

perceptions, and was defined as spatial sub-units within *tsabo* characterised by a given assemblage of plants that differs from that of the rest of the *tsabo* according to the farmers. Hence, micro-zones are units of homogenous plant agrobiodiversity management defined from the farmers' perspective. The farmers were asked whether there was a pattern in the way they associated and managed plant species in their clove-based *tsabo*. If so, they were asked to outline the micro-zones on the map of their *tsabo*. Some farmers considered that plant species management was homogeneous throughout their *tsabo*, in which case the *tsabo* corresponded to one micro-zone. In this way, 17 participatory maps and a total of 28 micro-zones (with one to three micro-zones per *tsabo*) were obtained. The surface area of each clove-based *tsabo* and its micro-zones were measured by GPS. The average size of *tsabo* was 0.5 ± 0.3 ha (min = 0.10 ha/max = 0.96 ha) and the sample of micro-zones was characterised by an average surface of 0.29 ± 0.23 ha (min = 0.03 ha/max = 0.87 ha) and an average slope of 17.7 ± 8.9° (min = 9°/max = 29°). Farmers' estimations of the abundance of vanilla and four frequent fruit trees (avocado, breadfruit, jackfruit and lychee) were recorded as the number of plants per micro-zone and, for clove trees, as well per age category. Indeed, exploratory surveys, conducted with the village chief and the elders, revealed that the age at which clove tree started producing cloves was a structuring factor for managing associated species because it does not have the same need for shade and light before and after becoming productive. According to the farmers, this is usually 10 years old, but may be younger or older depending on the growing conditions.

The participatory maps were coded to enable comparison of the spatial organisation of each species within *tsabo*. Two variables were selected to describe it: the position of the species according to the topographical gradient of the *tsabo* (i.e. top, center, bottom; Figure 5-3) and the way in which each species was spatially distributed compared to the other species over the total area of *tsabo* (i.e. random, edge, or aggregated; Figure 5-3). For each variable, the number of times a species was associated with it was counted. A Fisher's exact test was applied to the occurrence data of each variable to test whether each species was significantly associated to a given pattern of spatial organisation.

To characterise the practices of species association with clove trees, a typology of micro-zones was established based on the presence/absence of the different plant species and the age of the clove trees. Thus, before conducting the analysis, the micro-zones were separated into two groups according to the presence/absence of productive clove trees. In each group, the differentiation of the micro-zones was based on their similarity calculated with the Jaccard index: for each pair of micro-zones, the index corresponds to the ratio between the number of times a species is present in the two micro-zones and the total number of species excluding those absent from the pair (Borcard, Gillet and Legendre 2011; Abebe et al, 2013). This analysis was carried out in R (version 3.6.2) using the VEGDIST function of the VEGAN package (version 2.5.6). According to their similarity, the micro-zones were grouped in clusters defined through a representation based on the agglomerative complete linkage principle (Borcard, Gillet and Legendre 2011). The different types of micro-zone were identified according to the first level of discrimination of the cluster. Each type of micro-zone was described by computing

the mean plant species diversity and standard deviation, the species present in at least 60 % of the micro-zones belonging to this type, and the mean densities of the six most frequent species associated with clove trees.

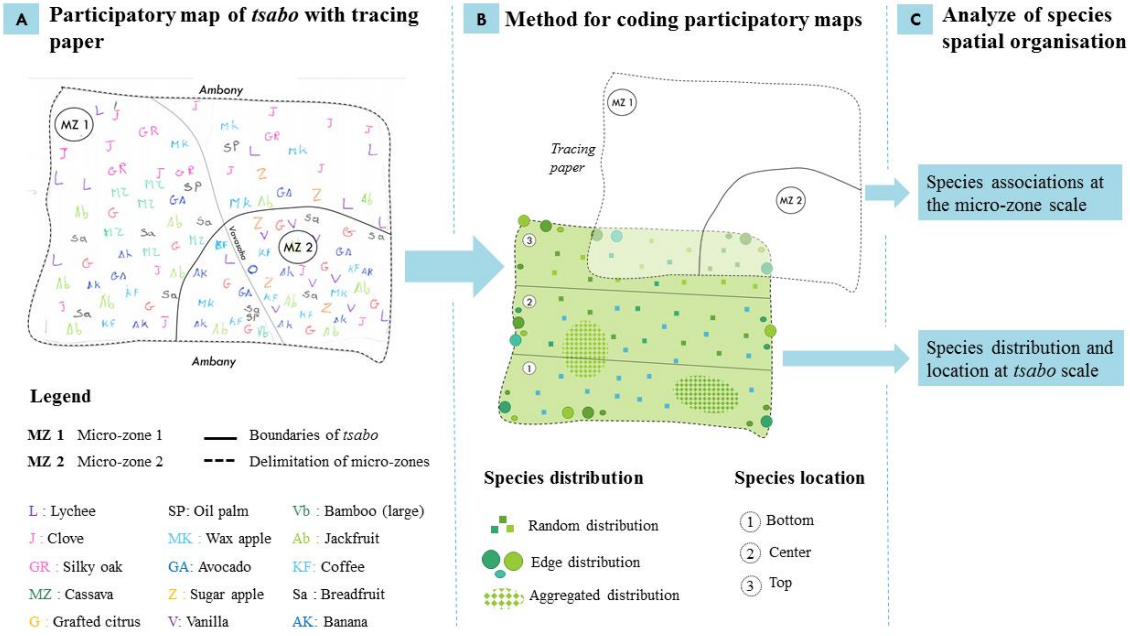



*Figure 5-3: Methodology of data collection and analysis for to the study of the two level of agrobiodiversity spatial organization within clove-base tsabo: the overall patterns of organisation (distribution and location according to the slope) and the associations of species in micro-zone. (A) is an example of participatory map obtained (ambony is the upper part of the tsabo, ambany is the lower part, and vavazaha corresponds to a stream or a runoff ravine). (B) illustrates how the map with plant species indicated and the tracing paper were coded.*

Study of farmers' local knowledge on ecological interactions between agrobiodiversity and clove tree

Semi-structured interviews of about one hours were conducted with each farmer in the sample to document their knowledge associated with their practices resulting from the spatial organisation of plant species. The questions first centred on the plant species that had positive and negative interactions with the clove tree. The farmer was asked to explain each type of interaction described, particularly the ecological process that made an interaction positive or negative. A discussion of the participatory map enabled to understand the spatial distribution of all plants represented, and to deepen the structuring role of other frequent species.

The information gathered through the 17 semi-structured interviews was summarised and transcribed in the form of an interactions map. This work is based on the mental model framework used to represent the mental construction of actors and their perception of their environment and general phenomena (Özesmi and Özesmi 2004). In our case, the map was intended to bring out farmers' perceptions of the ecological processes that occur in interactions between the clove tree and other species in *tsabo*. The map was built to represent the nature of the ecological process involved in the interaction (competition and growth, soil fertilisation, uptake of water from the soil, application of

water to the plant or to the soil, etc.) and the physical element involved (soil, water, light). The resulting map revealed the total number of interactions described by the farmers (i.e. the association of one species with an ecological process) and the number of farmers (out of the 17) who mentioned that interaction.

## 3. RESULTS

### ♦Emic description of *tsabo* plant agrobiodiversity

The plant diversity cited by the farmers over the 17 clove-based *tsabo* sampled consisted of 51 species, including 36 trees, seven herbaceous plants, two bamboos, four palms and two lianas (Appendix 3). Plant species were grouped in 28 families, the most common being Myrtaceae represented by five species, followed by Fabaceae, Moraceae and Rutaceae, each represented by four species. The plant diversity measured and based on farmers' reports varied between the 17 *tsabo* in the sample. On average, the farmers listed 15 species (± 4; range 8-22). Only 22 % of the 51 species cited were present in at least half of the *tsabo*. The most frequent fruit species were jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) and lychee (*Litchi chinensis)*, followed by breadfruit (*Artocarpus altilis*) and banana (*Musa* sp.). Coffee (*Coffea canephora*) and vanilla (*Vanilla planifolia*) were the two cash crops also present in about half of the 17 clove-based *tsabo* studied. A total of 54 % of the species were cited by fewer than eight farmers, and among these, 28 % were cited by only one farmer each.

The villagers grouped plant species into nine function categories (Appendix 4). The *azahoam bola* category (literally "gives money") corresponded to cash crops. The *bômafana* category (literally: "what is heated up the day before and eaten the next morning") grouped species whose carbohydrate-rich fruits and tubers are consumed for breakfast or in the afternoon (breadfruit; yam, *Dioscorea* spp.; cassava, *Manihot esculenta*). The *dessert* category contained a wide range of fruit species consumed as snacks during the day and not considered to be nutritional foods by the farmers (*dessert voankazo* for fruit trees and *dessert* for non-woody species). Two species were used to make vegetable oil (*menaka*): oil palm (*Elaeis guineensis*) for cooking and coconut palm (*Cocos nucifera*) for haircare. The *rô-mazava* category (literally "clear broth") corresponded to plants used to prepare broths to accompany rice. Two categories were defined for species that supply wood: *kitay* for firewood species (distilling and cooking) and *kakazo trano* (literally "house tree") for woody species used for carpentry (poles, beams, fencing, roofs, boards) but sometimes also used as firewood. Some farmers assigned lychee and coffee to different uses, as *dessert voankazo* or *azahoam bola*. Lastly, some species had a use that did not correspond to a named category. This was the case for shade trees (*Albizia stipulata*, *A. lebbeck)*, vanilla support trees (*Pachira aquatica*, *Ficus* sp., *Gliricidia sepium*) and *Raphia farinifera*, whose leaves were used to make string and woven stool seats.

### ♦Practices of plant agrobiodiversity spatial organisation in *tsabo*

The results of the Fisher's exact test indicated significant dependence between the plant species and the two variables describing the spatial organisation: the location of species according to the topography of the *tsabo* ($p$-value < 0.05) and the spatial distribution of species within ($p$-value < 0.0005) (Appendix 5). Analysis of the spatial distribution variable (aggregated, edge, random) showed that the farmers tended to distribute the species randomly across the *tsabo*, particularly clove and silky oak, which were planted in the entire *tsabo* (Figure 5-4.A). Only a few species, such as large bamboo and lychee, were usually planted on the border of *tsabo*. Aggregated distribution appeared to apply in particular to vanilla, banana, breadfruit and coffee (38 % ≤ occurrence ≤ 60 %). Concerning the spatial location variable, the farmers tended to prefer planting vanilla and coffee at the bottom of the *tsabo*, and to conserve large bamboo ("*be*" species) at the same location: more than 50 % of individuals of each of these species were growing at the bottom of the *tsabo* (Figure 5-4.B). The species that appeared to be the least demanding in terms of location were clove, lychee and *Gliricidia sepium*, as they were planted equally frequently in all three positions. The farmers seemed to let silky oak (*Grevillea banksii*) and traveller's palm (*Ravenala madagascariensis*) grow at the top of the *tsabo* (occurrence ≥ 50 %): since, when these plants appeared spontaneously in other locations, the farmers removed them.

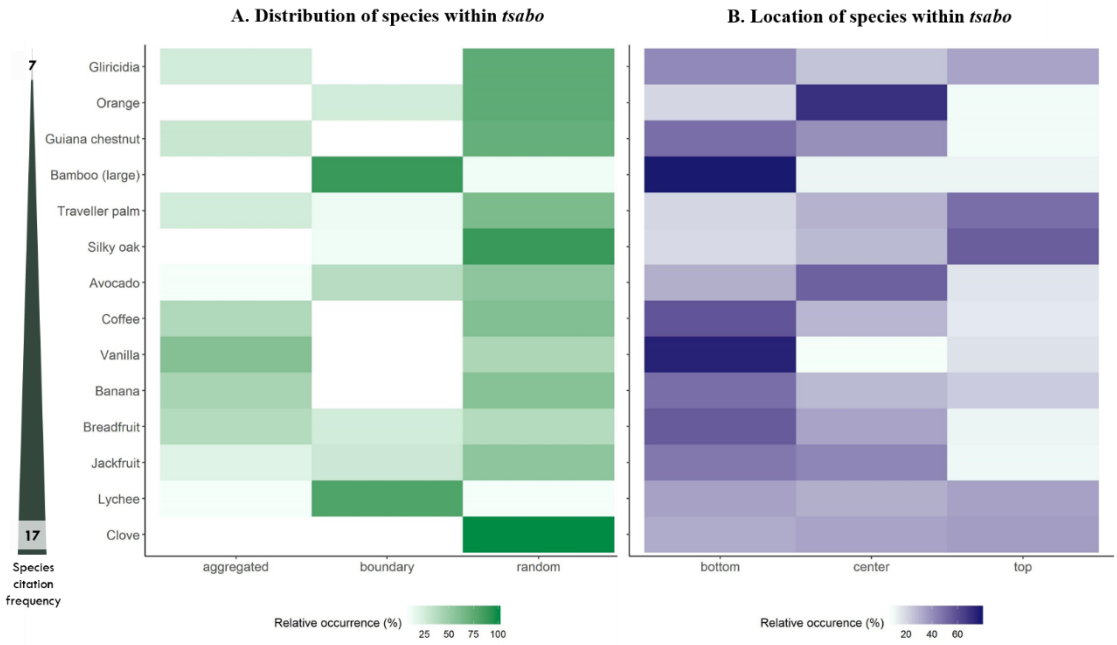
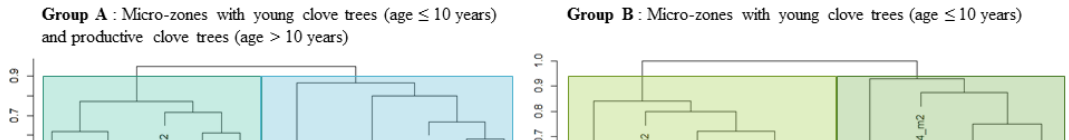



*Figure 5-4: Heatmaps based on the relative occurrence of the 14 most frequent species in tsabo (frequency > 7) according to the two variables selected for coding the spatial organization of species from the participatory maps, namely: (A) the way in which each species was spatially distributed compared to the other species and over the total area of the tsabo and (B) the position of the species according to the topographical gradient of the tsabo.*

### ♦Species association patterns within *tsabo*

The presence or absence of clove trees more than 10 years old (i.e. that produced cloves) differentiated two groups of micro-zones. Group A (*tsabo* with mixed age clove trees) comprised 13

micro-zones with clove trees that were over 10 years old and in which 82 % of the previously cited species occurred. Group B (*tsabo* with only young clove trees) included 15 micro-zones with no productive clove trees and in which 74 % of the previously cited species occurred. In each group, the discrimination of the micro-zones at the first clustering level of the dendrograms led to the identification of two types of micro-zone per group: mixed age clove 1 and 2 (Ma1, Ma2), young clove 1 and 2 (Y1, Y2) (Figure 5-5).




| Micro-zones' type | Mixed age clove 1 | Mixed age clove 2 | Young clove 1 | Young clove 2 |
|---|---|---|---|---|
| Number of micro-zones (N = 28) | 6 | 7 | 8 | 7 |
| Diversity of the type (N = 51 species) | 30 species | 27 species | 36 species | 19 species |
| Average diversity of micro-zone type | 13 ± 2 species | 10 ± 3 species | 12 ± 3 species | 5 ± 2 species |
| Other species with a frequency ≥ 80% | Banana<br>Jackfruit | Traveller's palm<br>Jackfruit | Banana<br>Lychee<br>Coffee | - |

*Figure 5-5: Typology of micro-zones and its characteristics related to the agrobiodiversity present in micro-zones. The presence or absence of clove trees that are over 10 years old (producing cloves) discriminates two groups of micro-zones: group A and group B. Calculation of the Jaccard index for each pair of micro-zones and the representation in dendograms, based on the agglomerative complete linkage principle, differentiate four types of micro-zones: A1, A2, B1 and B2.*

In the type mixed age clove 1 (Ma1), 60 % of the species cited by the farmers were represented. These six micro-zones contained high species diversity (mean: 13 ± 2, Figure 5-5). They were characterised by association of mature clove trees, young clove trees and various fruit species. The most frequent fruit species were banana, jackfruit, lychee, breadfruit, avocado, and coffee, which were present in at least four out of the six micro-zones. The density of young clove trees was high (161 ± 177 trees/ha, Figure 5-6) compared to that of the mature clove trees (84 ± 65 trees/ha). This type was also characterised by a high density of lychee (17 ± 18 trees/ha) and included three micro-zones rich in vanilla with the highest and most variable density (132 ± 183 plants/ha), compared to the other types (Ma2 = 56 ± 139, Y1 = 108 ± 215, Y2 = 4 ± 12 plants/ha). The type mixed age clove 2 was less diversified than Ma1. It accounted for 54 % of the previously cited species and the seven micro-zones it included had a mean species richness of 10 ± 3, with only mature clove trees present throughout this type of micro-zone (frequency = 100 %). The other three species present in at least 60 % of the micro-zones were traveller's palm, jackfruit, and lychee. Unlike Ma1, type Ma2 was characterised by a high density of clove trees over 10 years old (194 ± 93 trees/ha) and a low density of clove trees under 10 years old (39 ± 50 trees/ha).

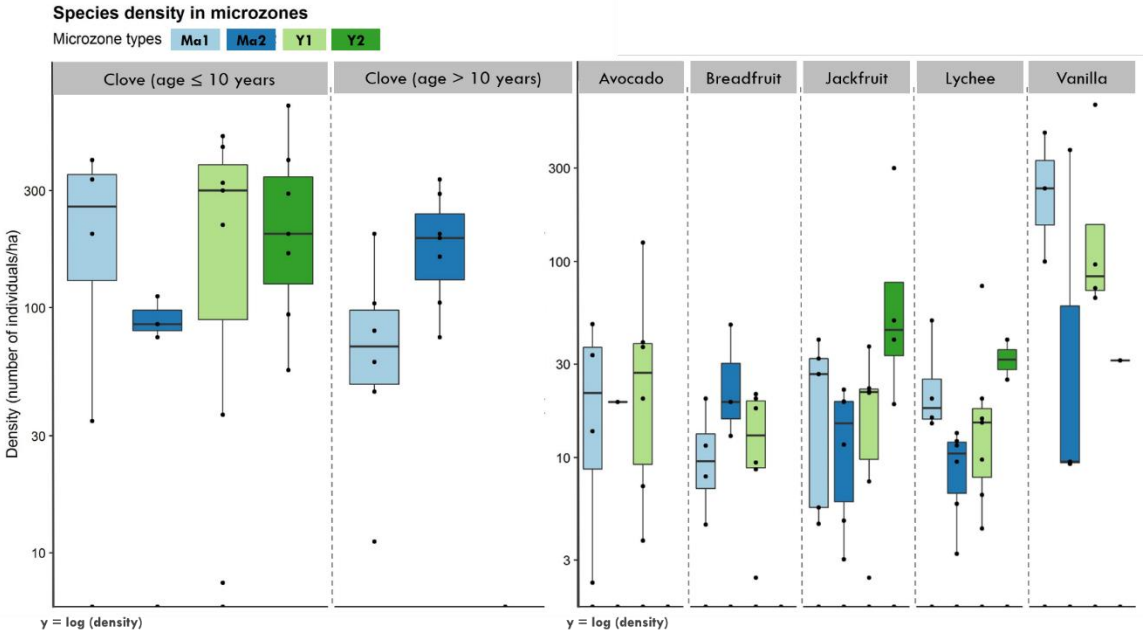



*Figure 5-6: Density (individuals per ha) of clove tree (productive and young tree), vanilla and four fruit tree species that frequently occur in tsabo (avocado, breadfruit, jackfruit, and lychee). The density was calculated from the number of individuals per species reported by the farmers and the area of tsabo measured by GPS. The y-axis is log-transformed.*

The two young clove types corresponded to the micro-zones with no clove trees over 10 years old. They were clearly distinguishable by their species composition: type Y1 micro-zones included 72 % of all previously cited species, whereas those ascribed to type Y2 only included 38 %. Type Y1 had high species richness (mean 12 ± 3 species) and stood out due to the presence of several fruit species: banana, lychee, and coffee (present in seven micro-zones), along with jackfruit, breadfruit, and avocado (present in six micro-zones). However, species composition was highly variable among type Y1, with few species shared between them. The densities calculated for young clove trees (230 ± 199 trees/ha,Figure 5-6), lychee (18 ± 24 trees/ha) and avocado (29 ± 42 trees/ha) were higher than in the other three types, but also much more variable, as shown by the standard deviations. Half the micro-zones contained vanilla, whose density sometimes reached 632 plants/ha. Type Y1 therefore also displayed high variability in terms of structure linked to variations in the density of the species present. Unlike type Y1, the seven type Y2 micro-zones clearly had a lower mean species richness, with 5 ± 2 species, and only had clove trees under 10 years old in common. This type was therefore less diversified but had the highest density of young clove trees (268 ± 211 trees/ha). The other main species in this type was jackfruit, which occurred at high density (58 ± 108 trees/ha).

### ♦Farmers' knowledge of ecological interactions

The farmers described a total of 31 interactions involving clove and another plant species (Figure 5-7): 21 with positive effects and 10 with negative effects. They referred to a total of 19 species among which eucalyptus was cited in different negative interactions by six farmers. The farmers

explained that this was because eucalyptus roots affected soil water, soil fertility and plant growth. Lychee was also cited as a negative species for clove tree mainly because its canopy provided too much shade. According to the farmers, silky oak, cited by 11, interacted positively with clove trees in several ways, by improving the soil and its fertility, and by providing productive clove trees with water and adequate shade. The interaction map underlined the central place of the soil in the ecological processes described by the farmers: it was cited in 17 positive interactions and five negative ones. The clove tree's need for light also seemed to be an important factor, as 11 farmers pointed to the role of seven species in providing suitable shade.

During the interviews, the farmers described some other types of interactions, without specifying either the associated species or the ecological process involved. For instance, some farmers explained that all the species that were not taller than clove trees had positive effects on it (banana, coffee, silky oak, avocado, and jackfruit). Conversely, all tall trees were considered to have negative effects on productive clove trees, as they cast too much shade on them.

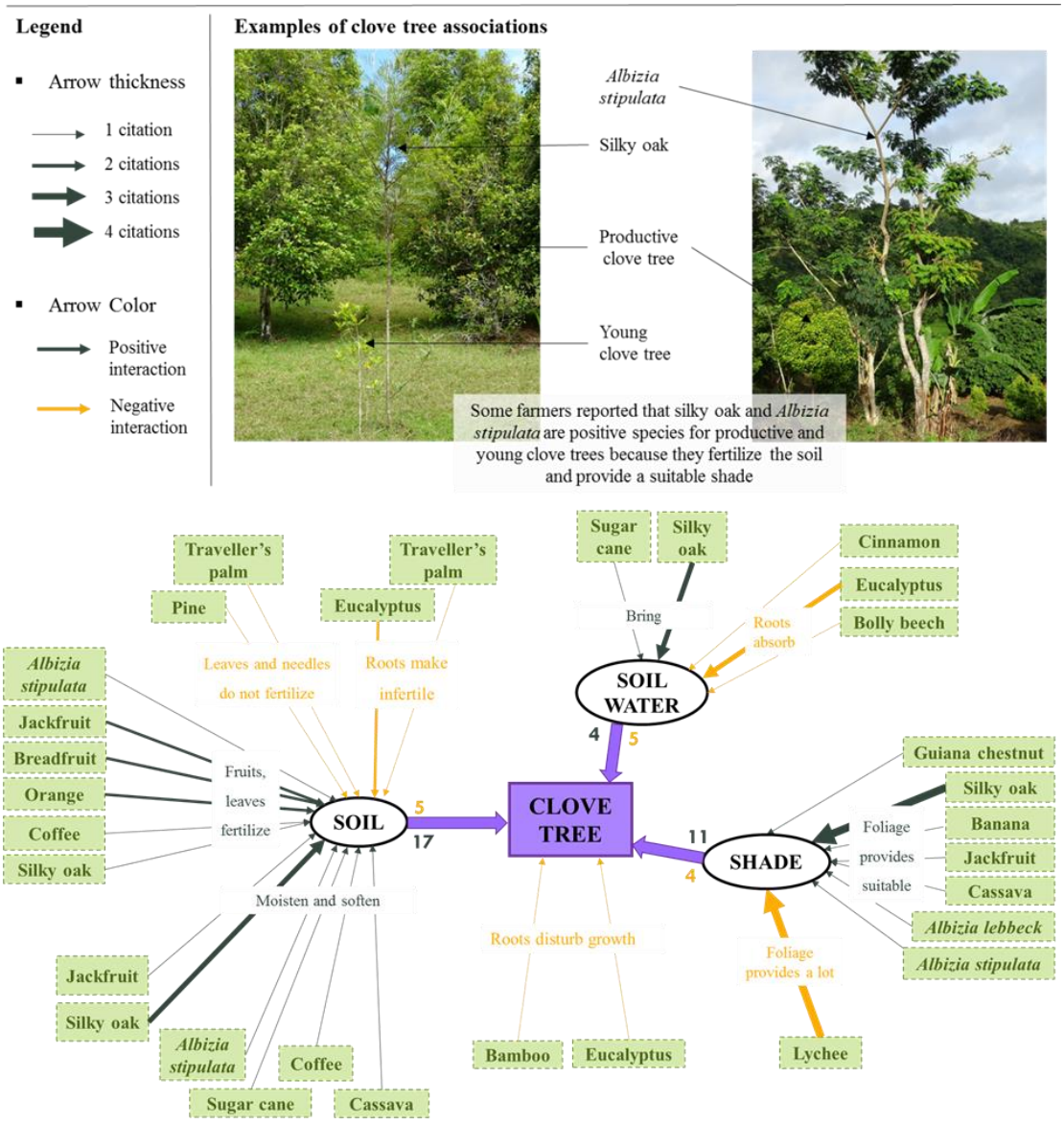



*Figure 5-7: Map of ecological interactions from farmers' knowledge (17 farmers) concerning interactions with plant species of clove-based tsabo that have positive and negative effects on clove trees.*

## 4. DISCUSSION

Our study of clove-based *tsabo* in the Vavatenina area in Madagascar confirmed that clove trees are associated with a range of perennial and herbaceous plant species, and in agroforests that present a higher level of plant diversity than the level measured in agroforests in nearby areas (Arimalala et al. 2019). However, comparison of the two studies was limited by differences in the methods used (lists versus floristic species inventory). Our findings are in agreement with those of other studies showing that plant diversity in agroforests is linked to several functions (food, income, timber, stake, fertility, shade tree), and is chosen by farmers based on the contributions of plants species to agroecosystem functioning (e.g. shade, fertility, stake) and to fulfil household needs (Reed et al. 2017, Díaz et al. 2018). The discussion hereafter provides insights into how farm strategies influence the plant diversity that

farmers cultivated and managed in their *tsabo* by taking socio-economic and environmental factors (e.g. cyclone, fluctuating sales price) into account. Our analysis of plant management practices revealed the existence of species associations and spatial organisation practices shared by most farmers. These practices can be partially explained by farmers' ecological knowledge, in line with other studies showing the close links between farmers' knowledge, their perception of the environment, and their farming practices (Cerdán et al. 2012, Vuillot et al. 2016).

### ♦Plant agrobiodiversity in *tsabo* is driven by the functions of the species as perceived by Betsimisaraka people and by farm strategies

This section describes and discusses the drivers of the current plant agrobiodiversity associated with clove tree in *tsabo*. Firstly, plant diversity appears to be largely driven by the diversity of functions associated with the different plant species, allowing farmers to fulfil a range of needs, for instance, food production for human or animal self-consumption, income generation, and the production of building material and firewood. Thus, the differences in the frequency of occurrence of the plant in *tsabo* are partly linked to their functions for the households, in particular, the diversity of fruit species. For instance, in addition to being highly appreciated as a fruit to eat, lychees have gained economic value since the improvement and the facilitation of lychee exports from Madagascar to Europe beginning in 1987 (Jahiel et al., 2014). The presence of banana, breadfruit, and jackfruit in most clove-based *tsabo* is linked to their importance for human consumption, especially in the lean season, and as animal feed to cope with the lack of pastureland (pers. obs.). The pasture available for zebus is decreasing as farmers build gates around their *tsabo* to prevent other zebus from entering. Banana also has non-food uses: its leaves are used as decoration during traditional ceremonies and as plates for meals, and the central stem cut into pieces is used to add organic matter to the soil. Generally, these fruits are mainly produced for self-consumption due to the lack of access to profitable markets, the lack of collectors and motorised public transport in the village studied here, which require produce to be transported on foot over great distances. Even if coffee has largely lost its commercial value since the economic crisis in the 1970s, thereby affecting Malagasy coffee producers (Blanc-Pamard et Ruf 1992), coffee trees were still observed in clove-based *tsabo* and harvests were sufficient to satisfy the low local consumption of Betsimisaraka people from villages and towns.

Secondly, another driver is related to farm strategies, designed around the household's activities (agricultural or off-farm activities) and its assets and means of production (Bannister and Nair 2003), and the infrastructure available to access markets (Bellow et al. 2008; Scales and Marsden 2008). In our case, it appears that the plant agrobiodiversity in clove-based *tsabo* differs among farmers depending on the extent of paddy rice they cultivate, and the strategy they adopt to achieve household food self-sufficiency (pers. obs.). In fact, annual rice production cannot satisfy a household's needs if the rice fields are not large enough. In this case, farmers rely on the crops they grow in their *tsabo* to





earn the cash they need to buy rice, and tend to increase the plantation of cash crops, and especially in agroforestry systems (Andriatsitohaina et al. 2020).

Lastly, an important driver of *tsabo* plant agrobiodiversity is risk management. Cultivating a range of species with similar functions is a strategy to maintain these functions in the face of perturbations of different kinds, particularly climatic (cyclones) and economic (market price variations) disturbances. Thus, the presence and the abundance of a particular species in *tsabo* is largely driven by its sensitivity to different kinds of risk. One example of how the perception of risks affects farmers' agrobiodiversity choices was provided by vanilla, which was not planted by all the farmers despite its economic boom in 2016 (Llopis et al. 2020), or only in small proportions compared to other cash crops. The farmers' motivation to cultivate vanilla has been affected by the highly fluctuating sales price of vanilla (Llopis et al. 2020), problems of theft (Neimark et al. 2019) and the fear of not selling their production in a good formal market (Hänke et al. 2018). Another risk is linked to cyclones, which has led farmers to reduce the number of tall trees planted in association with clove trees, they may fall onto the clove trees and destroy the plantation.

Studying plant agrobiodiversity based on interviews with the farmers allowed us to identify the species that are important to the farmers, but the real plant richness of *tsabo* was probably underestimated, and this method of collecting data may have introduced some bias concerning the relative importance of the different species. For instance, the large number of tree species cited could be linked to the particular importance of trees for Malagasy people (Bing, 2018; Rafidison et al., 2020) or, alternatively, could be explained by the attentional mechanism of visual saliency, which makes some items stand out from their neighbors and immediately attract our attention. Conversely, the frequency of annual species, such as cassava or yam, was probably under-estimated, as these species were often observed during our visits to the *tsabo*, but were rarely mentioned by the farmers. One explanation for the apparent limited importance given to tuber species is their status as "food-shortage" crops. Indeed, cassava and yam are usually consumed if rice was lacking in the lean period and are negatively associated with shortage, and the shame of not having enough rice to feed the family (pers. obs.). To check the real plant biodiversity in *tsabo*, flora inventories would enable more in-depth analysis and comparisons with other sites. The farmers interviewed did not mention the influence of development projects or government policies on how they managed plant agrobiodiversity. This may be due to the geographical isolation of the village we surveyed. However, several studies have shown that Malagasy government decisions drive farmers' strategies, for example, through the establishment of protected areas (Gardner et al. 2018, Andriatsitohaina et al. 2020).

### ♦Farmers' knowledge of plant interactions drives species association practices

Analysis of the micro-zones revealed the existence of different types of species associations in clove-based *tsabo* that are explained by the map of interactions highlighting the ecological and agronomic intertwined functions of plant species. The farmers therefore incorporate their perceptions

of the ecological interactions between species in their association practices. For instance, farmers reported that silky oak and jackfruit had two positive effects on mature clove trees by providing suitable shade and maintaining a degree of moisture in the soil thanks to the degradation of their fallen leaves, which improved soil fertility. Farmers' perception of such interactions explained the presence of jackfruit with clove in the two mixed clove age types and one of the two types of micro-zones containing young clove trees. Discussions with the farmers highlighted the positive impact of banana, Guiana chestnut (*Pachira aquatica*) and *Gliricidia sepium* on vanilla, by providing a favourable microclimate. This knowledge justified the presence of these three species in the micro-zones with a high density of vanilla.

Some species were found to co-occur in the same micro-zones, even though some farmers reported that their association had a negative effect on one or both species. This was the case of coffee and clove, frequently seen associated with vanilla in two types of micro-zones (mixed age clove 1 and young clove 1) whereas some farmers reported that these two trees have negative effects on vanilla. Likewise, lychee trees were associated with clove trees in all four types of micro-zone, despite the farmers' perception that they cast too much shade. Traveller's palm was present in two types of micro-zones (mixed age clove 2 and young clove 2) even though the farmers considered it has a negative effect on clove through its effect on the soil. Some authors also show that traveller's palm is a plant often linked to a degraded soil (Hladik et al., 2000), that suggests the palm would not be the cause of a degraded soil, but a consequence.

These examples of contradictions between knowledge and practices reveal how farmers manage trade-offs between the different ecological services and disservices provided by the species (Ango et al. 2014, Vaast and Somarriba 2014). Depending on their preferences and their perceptions of interactions between species, farmers either choose to favour a given species over others or look for synergies (Carrière 2002). This is often the case when the perceived interaction is that a given plant reduces the yield of another (especially a cash crop species), but otherwise provides numerous ecological services to the system (Ango et al. 2014). In a trade-off situation, farmers may choose not to plant a species because of its negative effects, but they may also decide to keep it and to change their practices to minimise its negative effects. One way of doing this is to modify the spatial organisation of the species within the system, as discussed later in this section.

Our study clearly identified the species that are most important to the farmers, along with the cropping practices and the knowledge associated with them. Yet, many species were only cited a few times and some knowledge was held only by one or a few farmers. Based on the hypothesis that such ecological knowledge can better explain contrasting and singular practices (Michel-Guillou and Moser, 2006; Abric 2011) one possible solution would be to create mental maps at the individual scale that could be used to more finely represent farmers' knowledge and perceptions (Isaac, Dawoe and Sieciechowicz, 2009; Vuillot et al., 2016), and in this way, to better understand the role of minor species,

explain rare practices, and also to focus more on the differences between farmers rather than on their similarities.

### ♦Farmers' perceptions of the environment drive spatial organisation practices of agrobiodiversity

The topographical gradient at the scale of the *tsabo* and its consequences for the environmental characteristics (soil, moisture, exposure to sunlight and to cyclones) appear to structure the spatial organisation of plant agrobiodiversity, making it possible to provide growing conditions adapted to the needs of each plant species. The map of positive and negative interactions of clove trees reveals the attention paid by farmers to species water, fertility, and light requirements, three factors which shape the biophysical heterogeneity of the environment. Analysis of the participatory *tsabo* maps highlighted common practices that can be explained by farmers' perception of the soil fertility, as reported in many ethno-pedological studies (Barrera-Bassols et al. 2006) and through the catena concept developed by Milne and his colleagues in the 1930s to formalize farmers' perceptions of the spatial distribution of soils along a topographical gradient (Milne 1947, Borden et al. 2020). Therefore, it appears that if the farmers favor the bottom of their *tsabo* to plant species such as vanilla or banana, it is because they know these species need fertile soil and moderate sunlight (*"Vanilla is grown at the bottom of the tsabo where it is cool and humid (mangatsiatsiaka) as the sun heats that part less"*). Bamboo is also left at the bottom because "when it rains it retains water*"* thereby playing the role of a physical barrier against erosion. These biophysical considerations were also described in other studies dealing with the factors of land use change and management in the north of Madagascar (Ramboatiana et al. 2018, Andriatsitohaina et al. 2020). Our results provide an overview of the different environmental factors considered by farmers in their agrobiodiversity management practices. Soil appears to be a major factor, in the sense that farmers decide on the spatial location of a species according to its adaptability to soils of variable fertility. This suggests that managing plant species in space is a way for farmers to cope with soil heterogeneity, thereby confirming previous qualitative observations (Altieri 2002). However, these exploratory results point to the need for a better understanding of farmers' knowledge of cultivated soils and their heterogeneity, and of relations between soil and plant agrobiodiversity (Niemeijer and Mazzucato 2003).

The spatial organisation of species was also a response to trade-offs between ecological services and disservices that determine the way farmers distributed species relative to the location of the other species. This was notably the case for three useful species planted on the boundaries of *tsabo*: lychee, because its canopy casts too much shade over clove trees, eucalyptus (firewood, timber) because its "hard roots" (*matoy vahatra*) take up water from the soil, competing with clove and vanilla, and the two bamboo species (land-use markers and construction materials) because their roots propagate quickly and begin competing with other species (*"bamboo spreads quickly and can kill clove trees"*). While farmers emphasized the ability of eucalyptus roots to "dry out" the soil (Amazonas et al. 2018), its allelopathic

effect on other species has also been proven (Chu et al., 2014), but not perceived by the farmers interviewed.

## 5. CONCLUSION

By providing a better understanding of how farmers make and adapt their choice of plant species and the spatial organisation of the species by accounting for socio-economic and biophysical factors, our study contributes to fill the research gap on these understudied aspects of farmers/agrobiodiversity interactions. Such understanding is key to support the design of biodiversity-based solutions for enhancing the resilience of agroecosystems. In particular, our results emphasise the holistic perceptions that farmers have of the local environment, and the complexity of their decision-making, based on trade-off between the different functions of plant species and their effects on the environment. Our study hence highlights the importance of paying particular attention to farmers' knowledge and decision-making process concerning plant species choice and spatial organization in development initiatives aiming at supporting agroforestry, as our results indicate that there is no "*one size fits all*" agroforestry solution. For that, our findings and methods based on an emic and participatory approach, pave the way for further interdisciplinary research on farmers/agrobiodiversity interactions, interweaving farmers' and researchers' knowledge through a "*multiple evidence base approach*" (Tengö et al. 2014).

In Analanjirofo region, the change in land use from shifting cultivation to agroforestry offers promising prospects for the expansion of cash crop (e.g. clove tree, vanilla) based on win-win systems for food production, economic development, and the ecosystem. In particular, agroforestry represents a way to restore land that was formerly forested, in order to limit erosion, regulate hydrological flows, and restore soil fertility (Martin et al. 2020). The complex mosaic of land use observed in our study area results from farmers' decisions and constraints, in many places and over many years. In that sense, sustainable restoration of the landscape through agroforestry is not relevant without the close involvement of farmers and the full recognition and consideration for their knowledge.

In this context of ongoing agroforestry transition, initiated and driven by local Betsimisaraka people, our study highlights the high adaptability of farmers and the way they use opportunities to adapt to changes, which are the result of the interweaving of multiple knowledge and practices they observed and tested *in situ* (Berkes and Usher 2000). Our results call for exploring the origin of - and changes in - local knowledge and factors that influence, weaken and/or enrich them, which would improve our understanding of the practices observed at a given moment in time and discuss their trends.





## 6. RESUME ET TRANSITION

**Résumé :** Cette étude permet de mieux connaître la gestion locale de l'agrobiodiversité dans les *tsabo* à girofliers, en termes de composition et d'organisation spatiale, et de mieux comprendre les facteurs qui influencent ces aspects de la gestion. Concernant la composition, je montre que :

- Selon les paysan.ne.s, cette agrobiodiversité regroupe 51 espèces au total (principalement des arbres) avec au moins huit espèces différentes dans chaque *tsabo*.
- Les espèces sont choisies par les paysan.ne.s selon différents critères : leur rôle dans le fonctionnement écologique de la parcelle et leurs effets (positifs ou négatifs) sur le giroflier, ainsi que leurs usages (vente et autoconsommation).
- L'abondance de ces espèces est étroitement liée à l'importance qu'elles ont pour les paysan.ne.s au regard de leurs propres stratégies raisonnées à l'échelle de l'exploitation, et aussi de considérations culturelles et personnelles.
- La composition de l'agrobiodiversité, en termes de diversité et d'abondance, reflète bien les dynamiques de diversification observées dans les paysages.

L'analyse de l'organisation spatiale de l'agrobiodiversité dans les parcelles à partir des cartes participatives de *tsabo* (exemples Appendix 6) met en évidence que les espèces ne sont pas réparties et associées de manière aléatoire et que cette gestion spatiale est réfléchie selon les interactions mutuelles entre espèces et avec le milieu. L'étude des connaissances paysannes relatives à ces interactions permet de mieux comprendre les pratiques d'organisation :

- Les espèces qui ont un effet négatif sur le giroflier direct (par exemple ombrage) ou indirect (par exemple fertilité du sol) sont cultivées en bordure et/ou éloignées du giroflier. Les espèces aux effets positifs sont plus nombreuses que celles aux effets négatifs. Ces dernières sont surtout des espèces à bois alors que les autres présentent plutôt un usage alimentaire.
- Plusieurs espèces ont une localisation privilégiée dans la parcelle en raison de la topographie qui crée des conditions de culture hétérogènes ; alors que d'autres espèces semblent être moins exigeantes.

Par ce travail, je mets en avant certains facteurs ayant contribué à l'émergence et au développement de l'agroforesterie :

- Les micro-zones mettent en évidence des associations d'espèces reposant sur diverses connaissances, plus ou moins récentes, qui se sont hybridées au cours du temps et qui ont aussi évolué avec le contexte.
- Les connaissances théoriques et empiriques montrent que dans le cas du giroflier, la diversification lui est bénéfique.

**Transition :** Que ce soit via la description des pratiques ou l'exploration des connaissances, ce travail souligne que le sol et sa fertilité sont des facteurs déterminants dans l'organisation spatiale de l'agrobiodiversité car ces deux conditions du milieu influencent positivement ou négativement la croissance et la production des cultures et, en retour, elles sont aussi impactées par certaines d'entre elles. Les connaissances que les paysan.nes détiennent sur ces effets mutuels semblent donc fortement conditionner la composition et la structure des *tsabo*, et donc les dynamiques de diversification aux différentes échelles spatiales.

Dans la perspective de mieux comprendre comment la fertilité du sol a contribué à ces dynamiques et comment elle est gérée durablement en mobilisant l'agrobiodiversité, le chapitre 6 approfondit les





connaissances paysannes spécifiques au sol et aux interactions sol-agrobiodiversité. Ce travail est mené auprès d'un plus grand nombre de paysan.ne.s afin de renforcer les résultats présentés dans le chapitre précédent. Les questions auxquelles il cherche à répondre sont les suivantes :

- Comment les paysan.ne.s de Vohibary décrivent-iels leur(s) sol(s) et ses propriétés ?
- Est-ce que les paysan.ne.s de la zone de Vavatenina observent-iels de façon consensuelle des changements de ses propriétés et lesquels ? et quelles sont les causes et les conséquences de ces changements ?
- Quels sont les changements de pratiques que les paysan.ne.s ont mis en place pour répondre à ces changements de sol ?
- Quelles sont les connaissances spécifiques sur les interactions sol-agrobiodiversité qui sous-tendent ces pratiques ? et comment sont-elles partagées au sein de la population de Vohibary ?
- Y a-t-il des espèces clés dans des ces évolutions de pratiques ?

# Chapitre 6 |LOCAL KNOWLEDGE OF THE INTERACTIONS BETWEEN AGROBIODIVERSITY AND SOIL: A FERTILE SUBSTRATE FOR ADAPTING TO SOIL CHANGES IN MADAGASCAR?

Juliette MARIEL[1, 2]
Vincent FREYCON[3,4]
Josoa RANDRIAMALALA[5]
Verohanitra RAFIDISON[6]
Vanesse LABEYRIE[1,2]

*Statut : Accepté*
*Revue : Journal of Ethnobiology*




Photo : Echantillons de sol le long de deux toposéquences du paysage de Vohibary et prélevés à la tarière par Nicolas Roura en 2019.

[1] *CIRAD, UMR SENS, 34398, Montpellier, France*
[2] *SENS, CIRAD, IRD, Univ Paul Valery Montpellier 3, Univ Montpellier, Montpellier, France*
[3] *CIRAD, UPR Forêts et Sociétés, F-34398 Montpellier, France*
[4] *Forêts et Sociétés, Université de Montpellier, CIRAD, Montpellier, France*
[5] *Département des Eaux et Forêts, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, BP 175, Université d'Antananarivo, Antananarivo 101, Madagascar*
[6] *Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo, Mention Biologie et Ecologie Végétales, BP 906, Antananarivo, Madagascar*

## 1. INTRODUCTION

In many tropical countries, shifting cultivation has long been the main form of subsistence farming for people who live in and relate with the forest (Cairns 2007, Pollini 2014). Shifting cultivation is based on a three-phase cycle of slash-and-burn clearing, cultivation, and fallow (FAO 1984, Messerli 2003). With population growth, farmers are reducing fallow time because less land is available. This reduction leads to soil degradation, i.e. the decreased capacity of soil to provide ecosystem goods and services (Adhikari and Hartemink 2016) including soil erosion and loss of soil fertility loss. Following (Karltun et al. 2013), we define soil fertility as the state of a soil that combines inherent (mineral composition, texture) and changing qualities (structure, organic matter content, phosphorus concentration) that give the soil different functional capacities (e.g. supporting plant growth). Soil fertility is typically assessed either by crop yield or through indicators like organic matter content, indicator plants, and water holding capacity. Soil erosion and soil nutrient exploitation resulting from shifting cultivation impact agricultural productivity, thus raising concerns about the sustainability of this practice (Garrity and Khan 1994, Mazoyer and Roudart 2017). In many places

throughout the tropics, farmers are thus adapting their farming practices to the new constraints resulting from changes in the soil (Saito et al. 2006, Padonou et al. 2014).

Local knowledge plays a key role in the process of co-evolution between farmers' practices and soils by helping design sustainable management methods for agricultural soils (Altieri and Anderson 1986). Farmers' knowledge is location specific and culturally relative, i.e. associated with a system of references, values and symbols specific to the population (Niemeijer and Mazzucato 2003). The ethnopedology literature highlights the importance of documenting farmers' knowledge of their soils to get a holistic understanding of the sustainability issues related to its management (Milne 1947, Sillitoe 2006). A large share of this literature focuses on the indicators used by farmers to assess soil fertility at a given time (Styger et al. 2007, Moges and Holden 2007, Dawoe et al. 2012, Karltun et al. 2013, Padonou et al. 2014, Brinkmann et al. 2018). However, studies documenting local knowledge about changes in the soil and adaptation over time are lacking (Niemeijer and Mazzucato 2003). In a context of agricultural transition, in our case in Madagascar where Betsimisaraka farmers recently shifted from slash-and-burn agriculture (*tavy*) to agroforestry systems (Arimalala et al. 2019, Michel et al. 2021, Mariel et al. 2021a), it is important to document farmers' local knowledge of the changes in the soils to be able to support local and agrobiodiversity-based agricultural development. Such knowledge is instrumental in helping farmers build agroecosystems that are resilient to global changes and adapted to local conditions (Altieri 2002, Jackson et al. 2010).

A second gap in the ethnopedology literature concerns local knowledge of the management of plant biodiversity in relation to changes in soils. Indeed, agrobiodiversity, which includes both cultivated plants that are introduced into the agroecosystem by farmers (Altieri 2002), and spontaneous plants that naturally colonize the agroecosystem (Vandermeer and Perfecto 1995), is a key resource to adapt to environmental heterogeneity and changes, including changes in soils (Niemeijer and Mazzucato 2003). Previous studies documented farmers' practices for the management of the different plant species in relation to soil in space (Junqueira 2015) and over time (Padonou et al. 2014, Mbow et al. 2014b). Other authors focused on local knowledge of plant species as indicators of soil fertility (Grossman 2003, Dawoe et al. 2012). However, few studies have documented farmers' knowledge concerning the use and management of agrobiodiversity, i.e. the diversity of plant species as a whole, to cope with changes in soil fertility.

Our study focuses on the knowledge of soil-plant interactions held by Betsimisaraka farmers of the northeast coast of Madagascar. Since the middle of the 20$^{th}$ century, farmers in this area have been engaged in a transition from shifting agriculture (*tavy*) to agroforestry, in which soil and changes in the soil play a key role. The first objective of our study was to document the observations of local farmers concerning changes in soil in the hills (*tanety)*, their causes and consequences, and how farmers modified their *tanety* cultivation practices to cope with these changes. Assuming that species diversification associated with agroforestry practices, is the main way for farmers to adapt to these changes in the soil, our second objective was to describe farmers' knowledge of the interactions

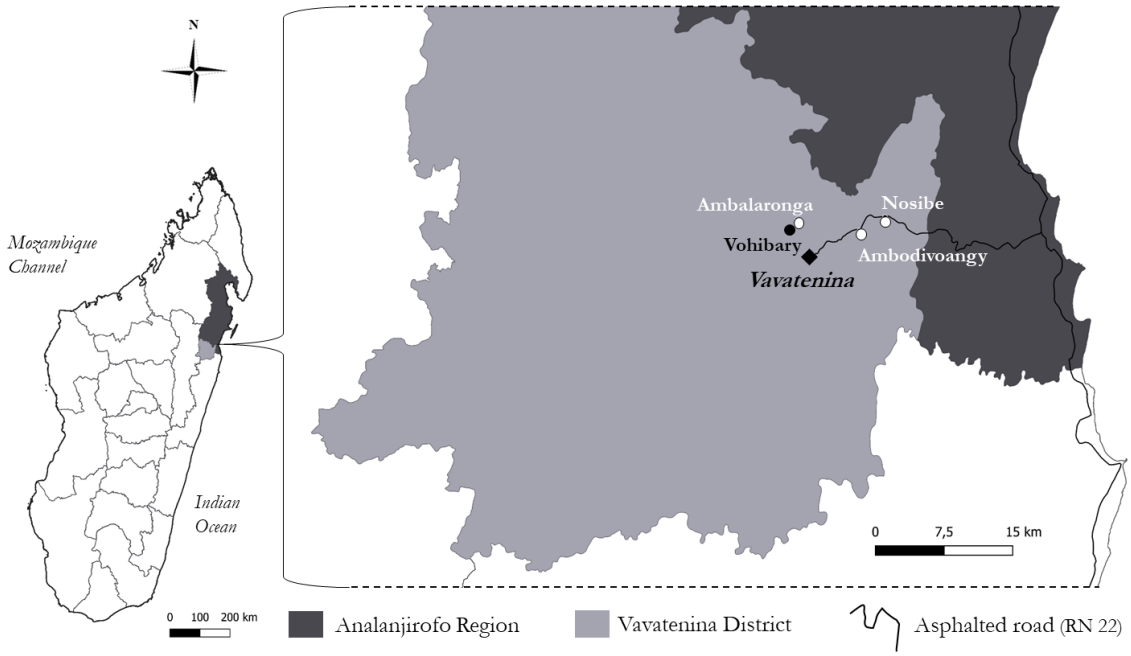
between soil and agrobiodiversity. To better understand changes in cultivation practices, especially the way farmers manage plant species in their agroforests according to their interactions with the soil and its variability in space and over time, we documented the local farmers' classification of soils, and the way farmers think the different plant species affect soil fertility and in return, are affected by it.

## 2. MATERIAL AND METHODS

### ♦Study site

The study was conducted in the four Betsimisaraka villages of Ambalaronga, Nosibe, Ambodivoangy, and Vohibary located in the rural district of Vavatenina, in the Analanjirofo region on the northeast coast of Madagascar (Figure 6-1). The Vavatenina area is characterized by a humid tropical climate, annual average rainfall 3600 mm, annual average temperature 24 °C (Jury 2003). The cool winter rainy season lasts from June to September and the hot summer rainy season from October to May. Regular cyclones affect the area between December and March. The Vavatenina landscapes are characterized by *tanety* (convex hills), separated by narrow valleys in which the lowlands are used to cultivate irrigated rice which is the main staple food of the Malagasy people. The *tanety* are characterized by summits whose altitude increases from 200 and 500 m a.s.l. from east to west, and steep slopes that can reach 50° thus exposing the *tanety* to a high risk of erosion. The *tanety* soils are mostly Ferralsols or Acrisols (WRB-2014[14]) and their depth varies depending on the topography and the intensity of erosion (Dandoy 1973). The lowland soils are Gleysols and the soil at the bottom of the slopes have humic properties. These soil and climatic conditions favor the development of rich agrobiodiversity. The *tanety* may be cultivated either with a single species, such as clove trees (*Syzygium aromaticum*) or cassava (*Manihot esculenta*), or *tsabo*, a local term used to describe land cultivated with several associated species including edible species. The species in a *tsabo* may be woody plants such as clove trees, coffee trees (*Coffea canephora*), fruit and timber trees, herbaceous plants such as banana (*Musa sp.*), sugarcane (*Saccharum officinarum*), pineapple (*Ananas comosus*) and tubers (e.g. yam-*Dioscorea* sp.), or lianas such as vanilla (*Vanilla planifolia*). The *tsabo* may also include herbaceous and woody fallow species and several species of bamboo. The size of each *tsabo* ranges from 0.1 ha to 1 ha (Mariel et al. 2021a). The specific composition and structure of the *tsabo* are thus very variable and are at the origin of more or less diversified agroforestry systems of varying complexity. Most of the products from *tsabo* are self-consumed by households. Some, e.g. bananas, yams, avocados and various leafy vegetables as *Spilanthes oleracea*, are sold on Vavatenina market, and sometimes on Fenerive market, located 60 km away. Only the products of clove trees (cloves and essential oil), vanilla and lychees are exported after being transported to the port of Tamatave, about 100 km away.

[14] IUSS Working Group WRB. 2014. *World Reference Base for Soil Resources 2014*. FAO, Rome




| Villages | ○ Ambalaronga, Nosibe, Ambodivoangy (LICCI protocol) | ● Vohibary | | |
|---|---|---|---|---|
| **Objectives** | To study the soil changes, their causes and consequences as observed by local people | To describe the changes in cultivation practices | To describe the local soil classification and define the knowledge of soil-AGB interactions to be studied | To study the knowledge of soil-AGB interactions |
| **Methods** | 19 semi-structured interviews<br>3 focus groups<br>(between 9 and 15 people) | 69 semi-structured interviews | 1 focus group<br>(17 farmers) | 84 surveys |

*Figure 6-1: Presentation of the study area and the different methods applied in the villages surveyd. Note: AGB: AGroBiodiversity. LICCI: Local Indicators of Climate Change Impacts programm research.*

### ♦Ethics approval

The study was conducted respecting the Code of Ethics of the ISE (International Society of Ethnobiology). A research permit was issued by the General Secretary of the Malagasy governmental institution "Directorate General for the Environment and Forestry" before the study began (N°299/19/MEDD/SG/DGEF/DGRNE). Before any interviews were conducted in the village, a meeting was held with the village leader and the inhabitants to fully inform them of the purpose of the study and how it would be conducted. The methodology, the type of data collected and their future use were explained to farmers so they understood what participating in the surveys would involve and the expected benefits of the study. The farmers participated voluntarily, were free from coercion, and had the right to withdraw at any time. Before taking part in the interviews, the farmers gave their prior informed verbal consent.

### ♦Interviews and focus group

All the interviews and focus groups were carried out by at least one researcher and our local interpreter. We always worked with the same interpreter so the questions and answers were always

translated in the same way, thus ensuring the consistency of the information collected. Before the beginning of the interviews and the focus groups, a preliminary stage of clarification and understanding of the surveys was carried out with the interpreter.

Changes in the soil: causes and consequences

We applied the protocol developed by the LICCI research program (Local Indicators of Climate Change Impacts, Reyes-García et al. 2021) in November 2019 following two steps (table in Figure 6-1). First, we conducted 19 semi-structured interviews in the three villages of Ambalaronga, Nosibe and Ambodivoangy to record changes in the soil observed by local people. By describing the changes to the local soil along with the farmers soil classification, we followed the approach of Niemeijer and Mazzucato (2003) who emphasized the importance of not considering farmers knowledge as static, but also how knowledge changed over time. Next, we coded the changes in the soil and their drivers into indicators in the four classes proposed by (Reyes-García et al. 2021): climatic, physical, biological and socio-economic systems. Second, we held three focus groups (one per village, each with between 9 and 15 participants) in order to collectively define whether the observations from the semi-structured interviews were consensual. At the end of the three focus groups, we retained only the observations that had reached a consensus and that cited the soil, either as an indicator of change in the physical environment or as a factor of change. To access different knowledge and perception profiles in both the interviews and focus groups, we chose people of different ages and gender and whose livelihood activities were linked to the use of environmental resources.

Changes in cultivation practices in response to changes in the soil

Between October and November 2019, we conducted 69 semi-structured interviews in the village of Vohibary to explore which cultivation practices had changed over the past three generations. The questions we asked were: "*Could you explain what has changed between the current cultivation practices of tanety and those of elders?*", "*Why and how do you think these changes took place?*". We only analyzed responses in which the changes in cultivation practices the farmers described were caused by a change in the soil. We classified the responses according to the type of practice (i.e. cultivation technique, fertilization, changes in equipment and in work time) and the type of modification (i.e. adaptation of an existing practice, abandonment or adoption of a new one).

Local knowledge of soil and soil-agrobiodiversity interactions

In April 2019, we organized a focus group with 17 farmers of different age categories located in Vohibary. The first step was to find out how they classified and described *tanety* soils. The questions we asked were: "*How many soil classes do you differentiate on tanety and according to the topography? What do you call them? Can you describe them?*". The second step of the focus group was to explore local knowledge concerning the interactions between the different plant species and the soil (hereafter referred to as "soil-agrobiodiversity interactions"), specifically whether farmers adapted their plant

species management practices to the different classes of soil they defined. To this end, the farmers were asked to show the location of the different soil classes according to the topography in a *tsabo* drawn on the ground, and then to link the different plant species with the soil class on which the species grew best. The different plant species were represented by cards that could be moved around. The farmers' explanations of the spatial distribution of plant species in the *tsabo* in relation to the soil classes and the topography helped identify groups of species based on their ability to adapt to the spatial heterogeneity of soils and on their effect on soil fertility.

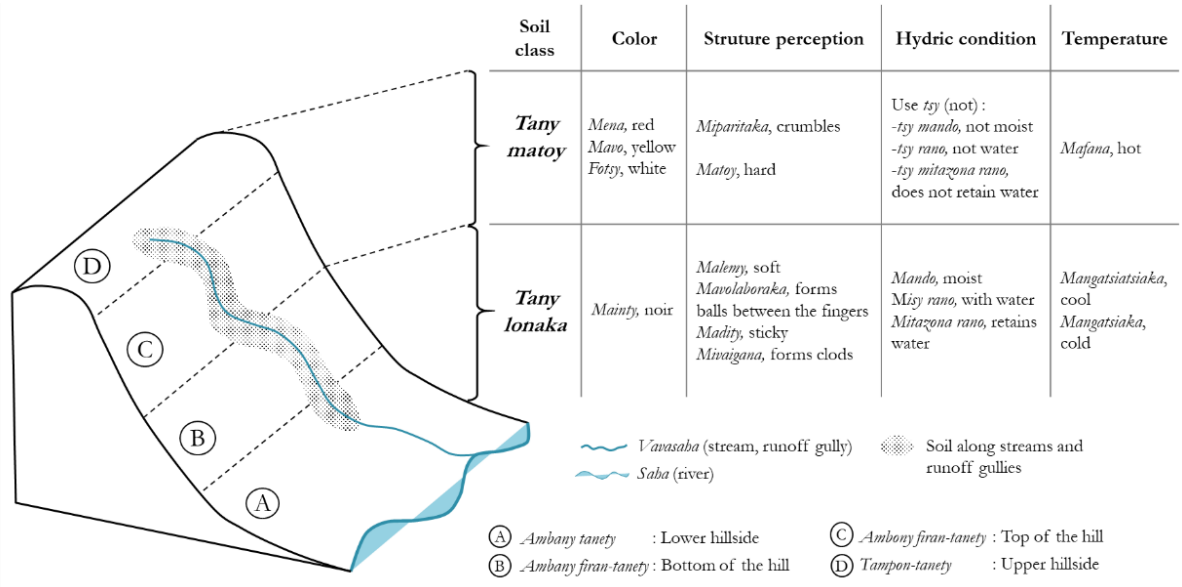
To further explore these two aspects of the soil-agrobiodiversity interactions (i.e. the soil requirements and the effect of the plant species on soil fertility), 84 individual surveys were conducted with farmers (23 women and 61 men) from different households in Vohibary (about 65 % of total households) (table in Figure 6-1). Two questions (A and B), formulated in the way with which local farmers were familiar, were posed concerning each of the 38 species that were characteristic of local agrobiodiversity and that played an important role in the *tsabo* (Mariel et al. 2021a). Question A asked whether the species *mifidy tany* ("chooses its soi", i.e. whether it requires particular soil conditions), or whether on the contrary, the species *tsy mifidy tany* ("does not choose its soil", i.e. it can adapt to all soil conditions). Question B asked whether the species *mandalonaka tany* ("makes the soil fertile"), or *mampatoy tany* ("makes the soil infertile"), or *tsy miova* ("is soil neutral").

## 3. RESULTS

### ♦Local soil classification

Farmers in Vohibary differentiated two classes of soil in relation to the topography of the *tanety*: the *tany lonaka* (fertile soil) associated with the lower part of the hill (parts A and B, Figure 6-2) and *vavasaha* (runoff gullies), and the *tany matoy* (literally "at the end of its life") associated with the upper part of the hill (parts C and D, Figure 6-2). The word *mamokatra* (contraction of *mamoa*: fruiting, and *vokatra*: harvesting, production) has been used to describe highly fertile soils that enhance plant growth and yield. The same word is also used to refer to a woman who has many children. To further describe these two soil classes, farmers used four criteria: color, structure, hydric condition and temperature (Figure 6-2). According to the farmers, some spontaneous species develop more easily than others on the two classes of soil. On a *tany matoy*, the species are mainly the poaceae *tenina* (*Imperata cylindrica*), the *ovotra* (*Ravenala madagascariensis*) and different ferns (e.g. *Pteris* sp.) that quickly colonize the area. On a *tany lonaka*, the species are herbaceous plants (*Stenotaphrum dimidiatum*, *Clidemia hirta*) and the invasive vine *takohaka* (*Rubus alceifolius*). Farmers further distinguished the two classes by explaining that the soil on the lower part of *tanety* and near streams was more *fasika*, i.e. sandy. The word *ambaratonga* (literally "ladder") was sometimes used by the farmers we interviewed

to specify that the soil was not uniform in depth. This metaphor could be related to the notion of soil profiles and horizons used by soil scientists.




| Soil class | Color | Struture perception | Hydric condition | Temperature |
|---|---|---|---|---|
| ***Tany matoy*** | *Mena*, red<br>*Mavo*, yellow<br>*Fotsy*, white | *Miparitaka*, crumbles<br>*Matoy*, hard | Use *tsy* (not) :<br>*-tsy mando*, not moist<br>*-tsy rano*, not water<br>*-tsy mitazona rano*, does not retain water | *Mafana*, hot |
| ***Tany lonaka*** | *Mainty*, noir | *Maleny*, soft<br>*Mavolaboraka*, forms balls between the fingers<br>*Madity*, sticky<br>*Mivaigana*, forms clods | *Mando*, moist<br>*Misy rano*, with water<br>*Mitazona rano*, retains water | *Mangatsiatsiaka*, cool<br>*Mangatsiaka*, cold |

*Figure 6-2: Local classification of tanety soils described by farmers from Vohibary in focus group (N=17). The table details the types of criteria used to differentiate the two soil classes.*

### ♦Changes in the soil: causes and consequences

People from Vavatenina area unanimously reported observing three changes in the soil: reduced fertility, increased compactness, and the slower decomposition of leaves left on the surface of the soil (Figure 6-3). Overall, the changes affecting *tanety* soils made it less fertile, drier, harder, and hotter. People reported that the main cause of these changes was *tevy ala* (deforestation). Overexploitation of the land due to a shorter fallow period, and the lack of shade trees were cited as drivers of reduced fertility. The decrease in seasonal rainfall was mentioned as a cause of soil drying. Local people reported that reduced soil fertility was the change in soil that most impacted their livelihood, mainly because it affected crops. They mentioned in particular that reduced soil fertility (i) increased crop pests and diseases, (ii) had negative impacts on crop growth, and (iii) had negative impacts on the taste of fruits and tubers (Figure 6-3). The fourth consequence reported by farmers concerned the non-cultivated vegetation of *tanety*, i.e. the fallow land and the stands of woody trees, specifically, a negative impact on their species richness and the abundance of the different species.

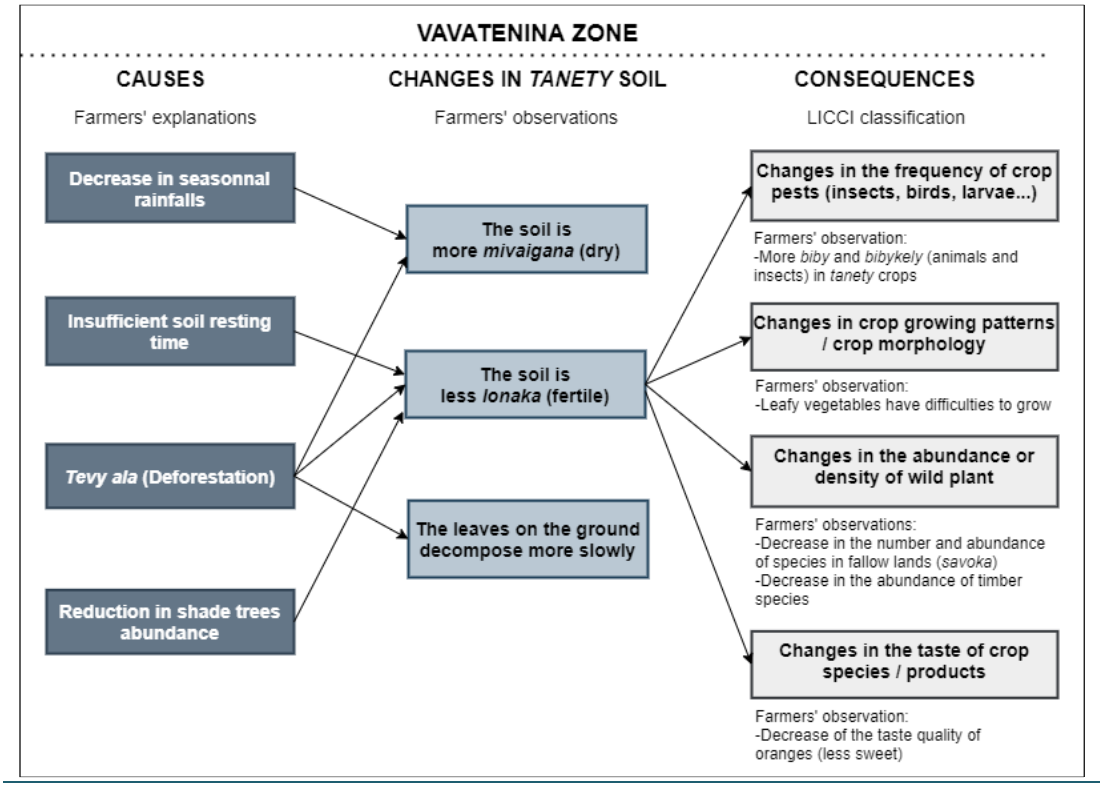



*Figure 6-3: Presentation of tanety soil changes, their causes and consequences that were described by people of the Vavatenina zone (from Ambalaronga, Nosibe and Ambodivoangy villages) and confirmed during focus groups conducted in the three villages. Note: the protocol applied were developed by the LICCI research program https://licci.eu/research-tools/.*

### ♦Changes in cultivation practices

To cope with soil degradation, the farmers in Vohibary identified seven types of changes in cultivation practices (Table 6-1). The adoption or adaptation of species associations and the use of organic matter inputs were the main changes made to cope with the reduction in fertility and in soil water content, and with the increase in soil compactness. For example, the use of *tain'ny aomby* (zebu manure) and *zezika* (composted plant material), primarily intended for fertilizing vegetable gardens, was applied to plantations in *tsabo* (Table 6-1, Figure 6-4). Another example was the cultivation of silky oak (*Grevillea robusta*) in association with clove trees. The farmers explained that silky oak had the ability to fertilize the soil and keep it moist. In addition, increasing their work time and using different tools (a pickaxe) were other ways of adapting to changes in the soil. Overall, the farmers now had to spend more time in their *tsabo* to care for their plants and trees. Planting techniques were also adapted to cope with the reduction in fertility, for example by digging deeper holes and filling them with *zezika* for the transplant of young clove trees. Two other planting techniques were adopted: the establishment of small individual clove tree nurseries, to replace "broadcast" seed planting, and the planting of yams in rice bags filled with a mixture of soil and sand, to allow the tubers to grow more easily.

*Table 6-1 : Changes in cultivation practices initiated by farmers from Vohibary in response to soil changes, based on the type of change (adoption, adaptation, abandonment) and the type of practice.*

| Type of change | Types of practices |
|---|---|
| **Adaptation** | **Changes in planting tools**<br>-Use of more powerful tools to dig the soil (as *angady:* pickaxe)<br>**Changes in working time**<br>-Increasing in working time spent caring for *tsabo* plantations and maintaining crops<br>-Increasing in the frequency of weeding |
| **Adoption or Adaptation** | **Practices of species associations**<br>-Planting silky oak (*Grevillea robusta*) to increase soil moisture<br>-Planting silky oak to fertilize the soil<br>-Planting vanilla at the foot of banana<br>-Planting shade trees (silky oak, *Albizia stipulata* and *lebbeck*)<br>**Techniques of organic matter input**<br>-Use of *tain'ny aomby* (zebu manure)<br>-Collecting leaves, grasses and young branches of *Litsea glutinosa* at the feet of banana and clove trees<br>-Use of *zezika* (mixture of zebu manure, dry leaves, vegetable waste and household garbage)<br>**Techniques of planting**<br>-Making deeper holes when transplanting clove trees<br>-Filling the holes with *zezika* for the transplantation of clove trees<br>-Use of jute bag filled with sand to plant yam tubers<br>-Designing small individual clove tree nurseries<br>-Making shelters in branches and leaves of traveller's palm (*Ravenala madagascariensis*) to protect young clove plants from the sun<br>-Covering surface roots with leaves |
| **Abandonment** | **Cultivation practice**<br>-Rice shifting cultivation<br>**Crop species**<br>-Coffee tree, taro |




*Figure 6-4 : Photographs taken by J.Mariel during several visits to tsabo owned by farmers from Vohibary. These photographs illustrate different soil fertilization techniques through the addition of organic matter. (A) Collecting leaves, grasses and young branches of Litsea glutinosa at the feet of banana and clove trees. (B) Collecting peelings and rotten fruits at the feet of vanilla. (C) Composting the banana stems with household and vegetable waste, zebu and pig manure and chicken droppings. (D) Cutting a dead banana stem into small pieces and piling them up at the feet of vanilla.*

### ♦Local knowledge of soil-agrobiodiversity interactions

Farmers in Vohibary defined their *tsabo* according to the two soil classes: *tany lonaka* (fertile soil) at the bottom and the *tany matoy* (infertile soil) at the top (Figure 6-5). The discussion with farmers during the focus group enabled the identification of five groups of species based on their spatial distribution in the *tsabo* and their interactions with the two soil classes. The first group consisted of raffia (*Raphia farinifera*) and bamboo (*Bambusa* sp., local species) planted at the bottom of the *tsabo* because of their need for very wet soil, plus at the edge of the *tsabo* because their roots *mampatoy tany* ("make the soil infertile"), according to the farmers; for this reason, these species should not be planted near other species. The second group consisted of 17 species, mainly fruit species associated with coffee (*Coffea canephora*), vanilla (*Vanilla planifolia*) and shade trees such as *Albizia stipulata* and *Albizia lebbeck*. The farmers explained that these species needed to be planted in a fertile soil to enable good growth and good quantity and quality yields. The third group was characterized by five species (four fruit trees and sugarcane) distributed at the boundary between the two soil classes. Farmers said that these species could grow on infertile soil but that they became productive later than when planted in fertile soil. The fourth group included nine species described by farmers as being able to grow on a *tany matoy*. These species were mostly trees, especially clove, but also included non-woody species such as cassava and pineapple (*Ananas comosus*). The fifth group included eucalyptus (*Eucalyptus* sp.) and lychee (*Litchi*

*chinensis*), two species adapted to a *tany matoy*, however farmers explained that because these species "make the soil infertile", they had to be planted on the edge of the *tsabo*.

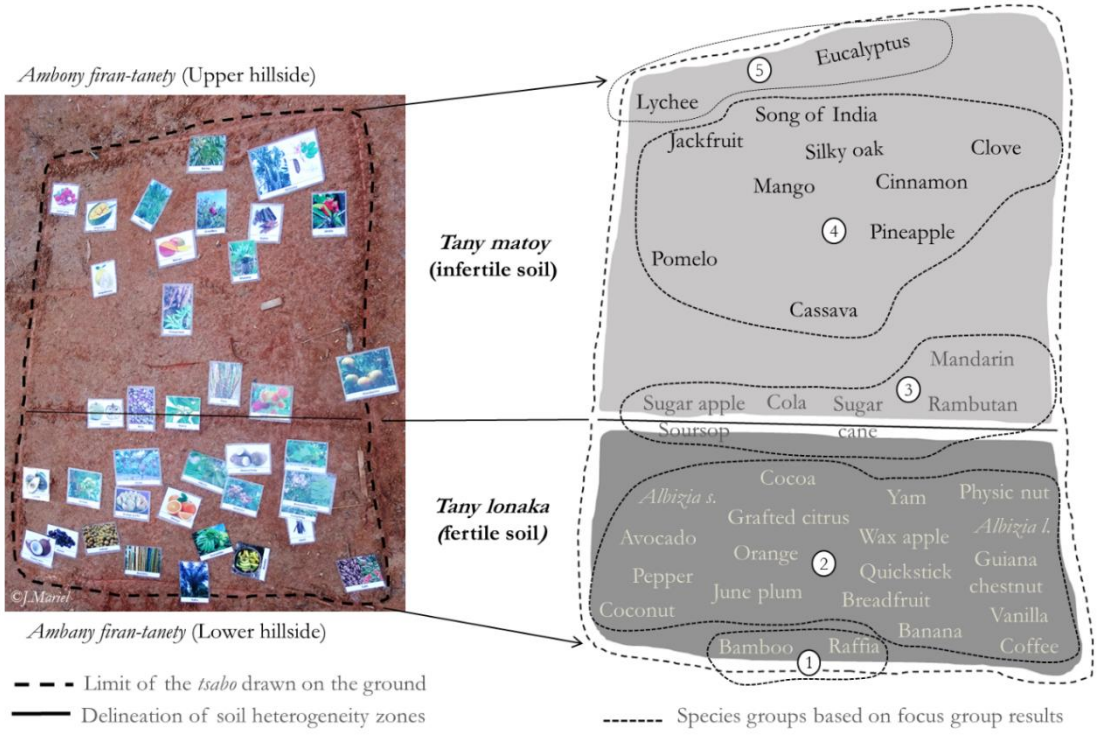



*Figure 6-5 : Result of the exercise carried out in focus group with farmers from Vohibary (N=17), for which they were asked to distribute 38 plant species (cards) in a tsabo drawn on the ground, according to species adaptation to the different soil defined by the farmers' classification and related to the topography.*

The analysis of the proportion of responses regarding whether or not each species *mifidy tany* ("chooses its soil") showed that the level of agreement among the 84 farmers surveyed varied with the species. Among the 38 species discussed, the soil requirements (question A) were clear for four species that "choose their soil" (banana, yam, coffee, raffia) and 10 species that "do not choose" (e.g. clove, eucalyptus, lychee), for which more than 75 % of farmers gave the same answer (Figure 6-6.A). There was less agreement (between 75 % and 60 % of responses) between farmers concerning the soil requirements of nine species that "choose their soil" (e.g. vanilla, pepper, large bamboo) and six species that "do not choose" (mainly fruit trees). For the remaining nine species (e.g. two citrus species, *Albizia stipulata*, cassava and sugar cane), there was no clear-cut response, as nearly half reported that these species "choose their soil" and the other half the opposite. We noted that farmers more frequently said "I don't know" in response to question A concerning cola and cacao than for the other species. Concerning question B, the effect of plants on soil fertility was clear (at least 75 % of responses) for six species that *mandalonaka tany* ("fertilize the soil"), including the two *Albizia* species, quickstick (*Gliricidia sepium*) and banana, and three species that *mampatoy tany* ("make the soil infertile"), such as large bamboo, song of India-*Dracaena reflexa*, and eucalyptus (Figure 6-6.B). For question B, the level of agreement was less clear (between 75 % and 60 % of responses) for nine species that fertilize the soil (e.g. several fruit trees, yam, vanilla and grevillea) and one species that "makes the soil infertile"

(cinnamon). The farmers explained that "it is often because of the roots that a plant makes the soil infertile" and gave the example of eucalyptus, which had *matoy vahitra* ("hard roots"). These *matoy vahitra* were characterized by a strong capacity to absorb soil water and to spread far and fast in the soil. The leaves were also mentioned because when they were thick and leathery, they did not decompose well. Regarding the "neutral" effect on fertility, only pepper had a proportion of responses above 45 %, and 14 other species had a proportion between 30 % and 45 %. Like with question A, cacao and cola accounted for the highest proportion of "I don't know" answers.

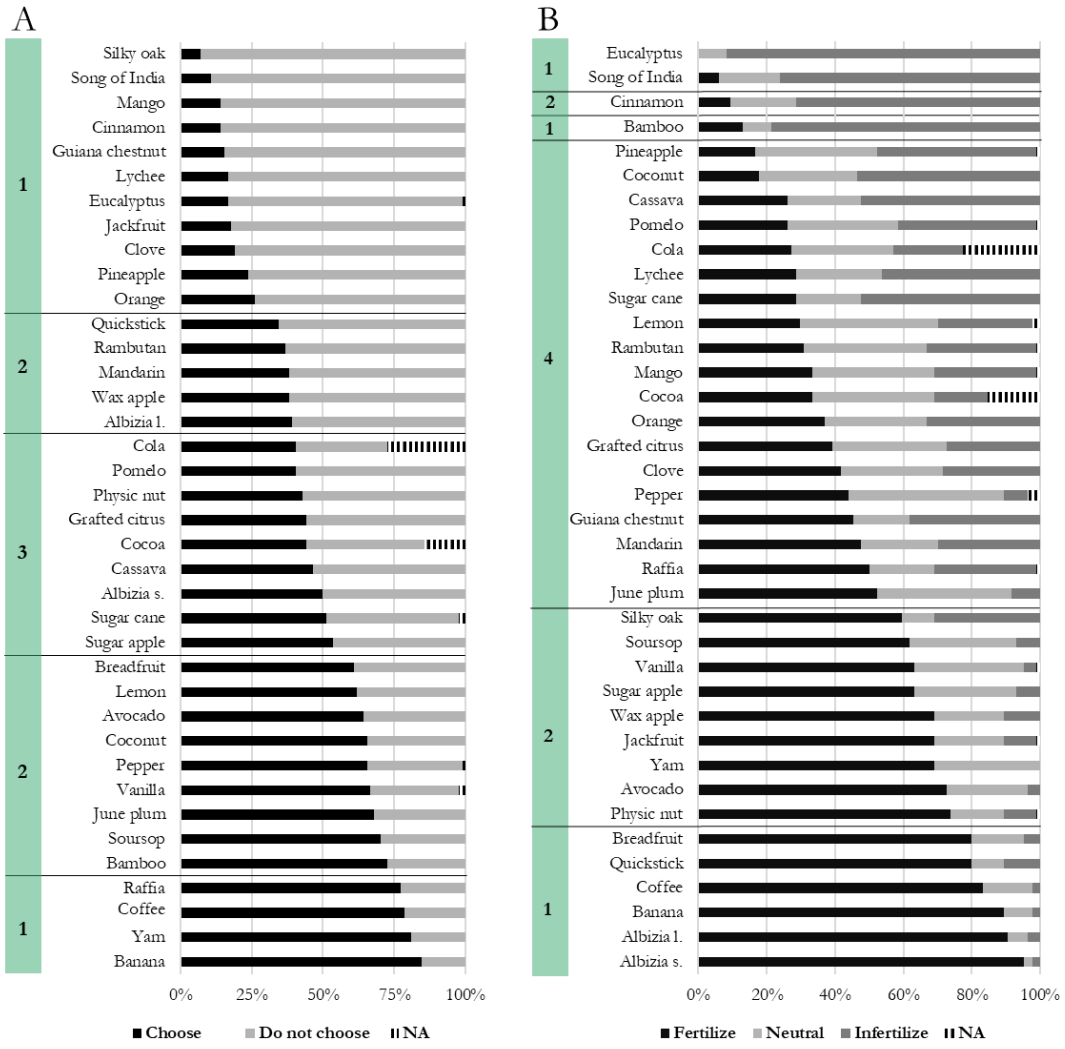



*Figure 6-6: Proportion of responses given by farmers from Vohibary (N=84) for each species (N=38) and according to the knowledge of soil-agrobiodiversity interactions: (A) the edaphic requirement of species, i.e. dire the species mifidy tany ("chooses its soil") or tsy mifidy tany ("does not choose"), (B) the effect of species on soil fertility, i.e. the species mandalonaka tany ("makes the soil fertile") or mampatoy tany ("makes the soil infertile") or tsy miova ("does not change the soil"). Note: 1: proportion of responses above 75 %, 2: proportion of responses between 60 % and 75 %, 3: proportion of responses between 40 % and 60 %, and relatively high proportion of non-responses, 4: proportion of responses between 30 % and 45 %.*

Our comparison of the results of the knowledge study on soil-agrobiodiversity interactions revealed that knowledge of the soil requirements of species was more shared by farmers than

knowledge related to the effect of species on fertility, with 30 species (N=38) for which more than 60 % of respondents agreed on the answer for the former, as opposed to 19 species for the latter. A comparison with the way farmers spatially distributed agrobiodiversity according to the soils of *tsabo* (Figure 6-5) revealed a clear link between the spatial position, soil requirements and their effect on fertility for some species. Among the 21 species planted in the lower part of *tsabo* (groups 1 and 2, Figure 6-5), 13 species "choose their soil" and 12 "make the soil fertile" (proportion of responses more than 60 %). Among the 11 species located at the top of the *tsabo* (groups 4 and 5, Figure 6-5), nine species "do not choose their soil" and three "make the soil infertile" (proportion of responses more than 60 %).

## 4. DISCUSSION

### ♦Farmers' knowledge and observations provide a holistic perspective of the soil and of changes to the soil

Our study provides insights into farmers' observations of changes in soils and their drivers, which has been the subject of limited research in ethnopedology. In the Vavatenina area, people reported that the soil of *tanety* has become less fertile since the disappearance of the forest. The forest was still present in 1966, but the extent of the forest was very unequal in the Vavatenina landscape and in Vohibary, only some "*remnants of primary forest*" remained (Dandoy 1973). These observations are in agreement with various scientific reports in Madagascar on soil degradation, including strong erosion and a decline in fertility (Brand and Pfund 1998, Gay-des-Combes et al. 2017), mainly resulting from the reduction in the fallow period for *tavy* rice production (Messerli 2003, Styger et al. 2007). Our interviewees did not explicitly mention *tavy* as the main cause for the loss of fertility, and mostly cited deforestation. Farmers in Vohibary also used the expression *haign'andro be* (literally "sunburn") to explain that in the absence of trees, the soil surface receives too much sun, which dries out the land and makes it more difficult to cultivate. The farmers' classification of soils reflects their perception of its degradation. They used the fertility criterion to distinguish two classes, fertile and infertile, and related these two classes to the topography using the criterion of color (Figure 6-2). This classification logic is close to the concept of "*catena*" (Milne 1947, Borden et al. 2020) illustrating the process of soil erosion made visible by changes in the color of the soil. In studies conducted in Madagascar (Saito et al. 2006, Styger et al. 2007, Brinkmann et al. 2018), the link between the soil classes distinguished by farmers and their distribution in the landscape in relation to topography is poorly described.

The focus group conducted with farmers in Vohibary showed that they differentiated *tanety* soils by using criteria related to soil physical qualities (compactness, moisture, temperature). These criteria are commonly reported in other ethno-pedological studies (Moges and Holden 2007, Karltun et al. 2013, Padonou et al. 2014, Huynh et al. 2021), but in our context, they also referred to the environment in which the soil is located, including the topography, but also the level of shade and the

plant species present through the effects of their leaves, roots or architecture on soil moisture, temperature and compactness. This indicates that the farmers' perception of soil fertility is holistic and is not only limited to soil texture and color. In that sense, they have extended the concept of soil fertility to the fertility of the whole agro-ecosystem and adapted it to the changes they observed. In a study of Betsileo farmers in the highlands of Madagascar undertaken to document their knowledge of soils, Blanc-Pamard (1986) reported that *tanety* soils were described by only a few criteria while paddy fields in the lowlands were differentiated in many classes associated with several combined criteria (e.g. color, moisture, texture to the touch, odor). In our study, Betsimisaraka farmers described *tanety* soils with precision, suggesting that *tanety* agriculture is more important to them than other forms of agriculture. One possible explanation is that, in the past, Betsimisaraka farmers were more reliant on *tavy* than the populations of the highland who mainly relied on paddy rice. In addition, Betsimisaraka farmers have probably also increased their knowledge of *tanety* soils since the expansion of clove cultivation (Danthu et al. 2014). Indeed, (Niemeijer and Mazzucato 2003) argued that "when new crops are cultivated, different soil characteristics may become the most important discriminating factors between soil types".

### ♦Farmers apply local technical adaptations to cope with degraded soil

Our study also documented changes the farmers made in their practices to adapt to soil degradation. Faced with degraded *tanety* soils, farmers in Vohibary apply a variety of fertilization, planting, tillage, and crop cultivation techniques that have also been observed in other tropical regions affected by soil degradation (Padonou et al. 2014, Mbow et al. 2014b). To adapt to drier and harder-to-work soils, they used more robust tools, and they also reported spending more time working in *tsabo* (Table 6-1). The use of manure and composted materials are frequent examples of short-term adaptive practices, but their sustainability is questionable because they depend on livestock that require grazing areas while land pressure is high on arable land. In our case, these practices were probably adopted after the 1970s, as Dandoy (1966) did not mention the use of zebu manure. He highlighted "*the low importance of livestock*", while Blanc-Pamard and Ruf (1992) mentioned this practice in relation with coffee cultivation in another part of the Analanjirofo region. The latter authors pointed out that this practice has become widespread with the return of young people from urban migration, for whom the only available land at an affordable price was degraded land. Thus, to "*recolonize*" these poor soils, holes were dug and filled with manure before planting coffee, similar to the *zaï* technique used in the Sudano-Sahelian region to restore the fertility of arable land (Roose et al. 1993). We hypothesize that the same type of phenomenon occurred in Vohibary and more broadly in the Vavatenina area, which was formerly a coffee-growing region. We also observed the use of two techniques for the cultivation of clove trees that were previously associated with coffee (Blanc-Pamard and Ruf 1992): the establishment of clove tree nurseries using compost or manure, and the transplanting of young clove plants also by digging holes and filling them with organic matter. Farmers thus transposed the

technical knowledge they acquired for coffee cultivation, but also for taro (Rakoto Ramiarantsoa and Lemoigne 2014), to clove trees, which gradually replaced coffee from the 1970s on along the northeast coast (Danthu et al. 2014). Documenting these local coping practices combined with farmers' description of soils could help develop technical recommendations for more sustainable local soil management based on farmers' knowledge (Barrios and Trejo 2003, Krasilnikov and Tabor 2003, Huynh et al. 2021).

### ♦Farmers' knowledge of soil-plant interactions addresses declining soil fertility through agroforestry

The main contribution of our study to the ethnopedology literature is to show that, in five decades, farmers developed new knowledge and practices based on the use of crop diversity to adapt to the changes in the soil resulting from their practice of shifting rice cultivation *(tavy)*. Indeed, 50 years ago, farmers dominantly practiced *tavy* farming and frequently looked for new fertile soil by moving away from the village to still forested areas: "*the only remaining humus-bearing land is located on the tops of the highest hills that limit the terroir*" (Dandoy 1973). Nowadays, we observed a variety of practices not only aimed at maintaining soil fertility but also at adapting to infertile soil; these practices are based on plant species diversification and on a detailed knowledge of their adaptation to the different types of soils as well as on the impact of each species on soil fertility. Species such as silky oak and banana are now planted for their positive effects on the soil and thus indirectly on other associated species, in particular clove (Mariel et al. 2021a) but also vanilla. The two *Albizia* species (*lebbeck* and *stipulata*) that served as shade trees in coffee plantations (Blanc-Pamard and Ruf 1992) continue to be planted, not for the coffee trees but to maintain soil moisture and soil temperature that both contribute to soil fertility. Diversification and replacement of one species or variety by another are recurrent practices in response to soil degradation. However, the choice of a species or variety is often based on its ability to survive in the new soil conditions (Padonou et al. 2014, Mbow et al. 2014b). In our case, our study of farmers' knowledge and practices shows that perennial species are also cultivated for their ability to regenerate soil fertility (Table 6-1, Figure 6-6), i.e. they represent a long-term adaptation strategy.

Documenting local knowledge of soil-agrobiodiversity interactions provides a better understanding of the role of soil in the spatial distribution of the species implemented by the farmers, which appears to result from their own choices, combining their knowledge of soil classification (linking fertility and topography) with their knowledge of soil-agrobiodiversity interactions (soil requirements of species and their effects on fertility). Dandoy (1973) and Blanc-Pamard (1986) reported similar observations, but at the landscape scale: "*the apparent disorder of the rural landscape hides an adaptation of crops to each type of soil*". Farmers therefore seek to cultivate species with low soil requirements on infertile soil, and know that other species need a fertile soil. Among the species that require a fertile soil, the farmers explained that many of them maintain fertility. These species include

coffee and its two shade trees (*Albizia* sp.) as well as banana and many other fruit trees. Our observation concerning the distribution of coffee and banana according to the topography and soil conditions of *tsabo*, mostly at the bottom of the slope and on the richer soils, is in line with the observations made by Ruf and Blanc-Pamard (1992). These authors reported that in parallel with the monoculture coffee plantation promoted during the French colonial era, farmers developed diversified coffee plantations with various edible crop species (Blanc-Pamard and Ruf 1992). Dandoy (1973) also reported the association of coffee with fruit trees in home gardens whose soil was enriched by inputs of household waste.

Our study also sheds light on certain changes in cultivation practices induced by changes in the soil. In particular, the practice of associating species, such as silky oak with clove and banana with vanilla, is explained by the fact that more than 60 % of farmers surveyed know that these two species "make the soil fertile" and that they can therefore improve the growth and productivity of crops in association with them. The reason many fruit trees "make the soil fertile" is related to their unharvested fruits that fall to the ground. When the fruits collect at the feet of vanilla or clove trees and mix with dry leaves, they supply organic matter by decomposing.

This knowledge of soil-plant interactions forms a "*fertile substrate for designing new technologies that respect both the environment and local practices*" (Jankowski 2014) and calls for reflection on modes of fertility regeneration and restoration of degraded landscapes that are adapted to the agroforestry transition in the Vavatenina area. These practices could be based on the use of species that both fertilize the soil and have lower soil requirements, making it possible to plant them on degraded land as *mena* and *matoy* soil on *tanety*. This is notably the case for *Albizia stipulata* and *Gliricidia sepium*, two species of the Fabaceae family that help enrich the soil (Szott and Kass 1993, Sharma et al. 2009). Jackfruit and silky oak could also be planted in association with clove trees, especially since one tree is a source of food and the other a source of wood (Mariel et al. 2021a). Conversely, introducing cinnamon and eucalyptus in *tsabo* requires taking their negative effect on fertility into account to be sure their presence will not lead to deterioration of the soil and harm the surrounding crop species. Many researchers recognize that sustainable agroforestry practices are the product of local knowledge (Thapa et al. 1995, Altieri 2004), but more efforts are needed to co-construct agricultural development with local actors based on farmers' knowledge articulated with scientific knowledge appropriate to the local context (Rist and Dahdouh-Guebas 2006, Jacobi et al. 2017).

## 5. CONCLUSION

Our study shows that Betsimisaraka farmers do observe changes in soils, which they mainly attribute to their own impact on the forest cover, and that these farmers continuously update their knowledge and management practices in response to such changes in the soil. Our results also reveal that farmers have a holistic view of the fertility that is not limited to soil characteristics, but includes the whole

agroecosystem. Finally, by describing how farmers relate plant diversity to soil fertility and use this knowledge to adapt to changes in the soil, our study contributes to a topic that has been the subject of limited research in the field of ethnopedology. This study underlines the importance of including local knowledge of soil and its interactions with agrobiodiversity for the sustainable soil management in agricultural development projects.

## 6. RÉSUMÉ ET TRANSITION

**Résumé :** Dans ce chapitre, je montre que les paysan.ne.s de Vohibary distinguent deux grand types de sol de *tanety*, selon s'il est fertile ou pas. Iels décrivent ces types de sol avec des critères de couleur, de compacité et de localisation dans le paysage selon la topographie. Si cette classification basée sur la fertilité traduit la dégradation globale du sol observée par les paysan.ne.s, je mets aussi en évidence qu'elle reflète une vision plus holistique de la fertilité :

- elle ne se résume pas uniquement à la fertilité du sol (c'est-à-dire des propriétés physico-chimiques) mais englobe aussi celle de l'environnement, c'est-à-dire des conditions agroécologiques favorables aux cultures (par exemple lumière/ombrage, humidité).

Par ailleurs, je relate que cette baisse de la fertilité est observée plus généralement par les paysan.ne.s de la zone de Vavatenina. Ces derniers décrivent :

- des causes surtout liées à la déforestation et à la diminution des arbres d'ombrage dans les parcelles, mais aussi à la réduction du temps de jachère ;
- des conséquences sur la croissance et sur le développement des espèces, cultivées et non cultivées, sur la fréquence des ravageurs de cultures et aussi sur le goût des produits agricoles.

En réponse à cette baisse de la fertilité, ce travail présente la diversité des changements que les paysan.ne.s de Vohibary ont opéré dans leurs pratiques agricoles et notamment au moyen de l'agrobiodiversité :

- l'association avec des espèces bénéfiques pour la fertilité du sol ou la "fertilité" de la parcelle ;
- la substitution de certaines cultures par d'autres.

En étudiant plus largement les connaissances paysannes sur les interactions sol-agrobiodiversité, cette étude permet de préciser et de mieux comprendre les pratiques d'organisation spatiale de l'agrobiodiversité (cf. chapitre 5) ainsi que les changements de pratique en réponse à la baisse de fertilité. Ainsi, pour 38 espèces, les résultats informent sur :

- leur besoin en un type de sol particulier ou non ;
- leur effet sur la fertilité du sol.

Ces résultats mettent également en évidence les espèces pour lesquelles les paysan.ne.s partagent globalement les mêmes connaissances et celles pour lesquelles il y a moins de vision partagée.

**Transition :** Les résultats de cette deuxième partie permettent de comprendre que la mosaïque agroforestière du paysage de Vohibary est la résultante d'une gestion de l'agrobiodiversité qui, d'une part, se caractérise par une diversité de plantes associées à divers usages et fonctions, et, d'autre part se définit au travers de pratiques d'organisation spatiale multi-échelles et raisonnées par rapport au milieu biophysique. Je montre notamment comment l'agrobiodiversité et sa gestion sont un moyen pour les paysan.nes de s'adapter à l'hétérogénéité spatiale du sol et à la baisse de sa fertilité. Je mets ainsi en évidence que les dynamiques agroforestières locales sont portées par des connaissances théoriques et empiriques qui évoluent en réponse aux changements du milieu.

Par ailleurs, l'accès à l'agrobiodiversité et aux connaissances associées est une condition importante de la capacité des paysan.ne.s à innover et à adapter leurs pratiques en réponse à des changements. Étudier l'accès aux ressources biologiques et immatérielles est donc essentiel pour comprendre les dynamiques agraires. Cette troisième et dernière partie analyse donc comment les

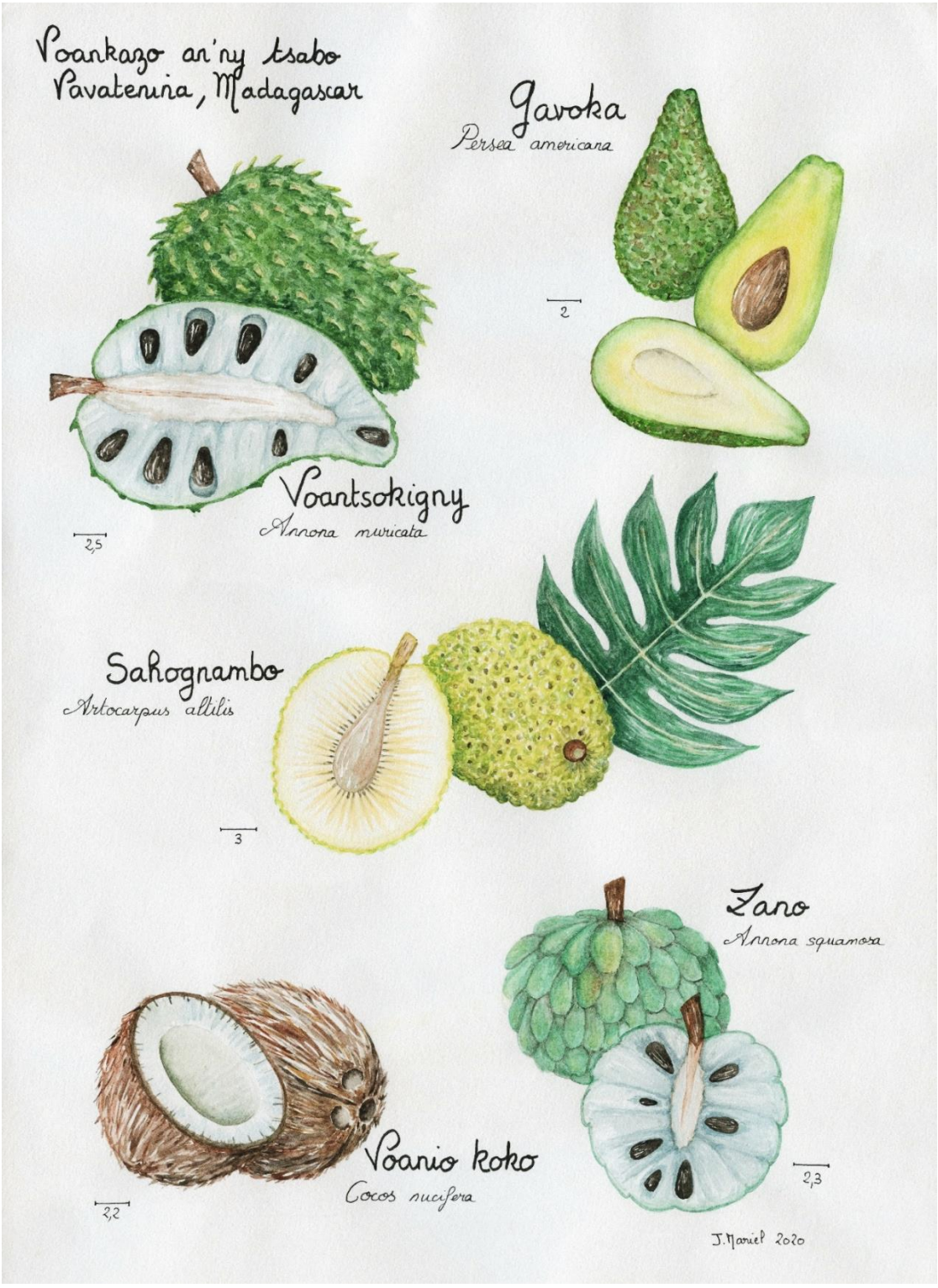
paysan.ne.s de Vohibary acquièrent des propagules et des connaissances concernant trois espèces agroforestières (bananier, giroflier, vanillier), et comment ces ressources circulent au sein du village. Parmi les différents aspects des modes d'accès, ce travail s'intéresse plus particulièrement aux facteurs pouvant influencer la diversification, notamment les caractéristiques socio-culturelles et le caractère exogène des connaissances et des propagules. Il cherche ainsi à répondre aux questions suivantes :

- Quelle est la diversité des sources de connaissances et de propagules mobilisées par les paysan.nes ?
- Quelle est la part des ressources provenant de l'extérieur du village ?
- Y a-t-il des différences selon l'espèce végétale considérée ou le type de ressource ?
- Comment les connaissances et les propagules circulent-elles au sein du village et entre ce dernier et l'extérieur ?
- Est-ce que certain.e.s paysan.ne.s se démarquent-iels des autres du fait de leur position centrale dans la circulation et/ou de leur connexion avec l'extérieur ?



# PARTIE III

## La circulation des plantes et des connaissances paysannes



# Chapitre 7 |TRANSLOCALITY IN THE CIRCULATION OF PLANTS AND KNOWLEDGE: PERSPECTIVES FOR AGRICULTURAL SYSTEMS RESILIENCE

Juliette MARIEL[1, 2]

Isabelle SANCHEZ[3]

Nicolas VERZELEN[3]

François MASSOL[4]

Stéphanie M. CARRIERE[5]

Vanesse LABEYRIE[1,2]

*Statut : En cours de finalisation*

*Revue : Agricultural Systems*




Photo : Dégriffage des boutons floraux de giroflier avant séchage, 2019.

[1] *CIRAD, UMR SENS, 34398, Montpellier, France*

[2] *SENS, CIRAD, IRD, Univ Paul Valery Montpellier 3, Univ Montpellier, Montpellier, France*

[3] *Univ. Montpellier, INRAE, Institut Agro, UMR 729 MISTEA, Montpeller, France*

[4] *Univ. Lille, CNRS, Inserm, CHU Lille, Institut Pasteur de Lille, U1019 - UMR 9017 - CIIL - Center for Infection and Immunity of Lille, F-59000 Lille, France*

[5] *SENS, IRD, CIRAD, Univ Paul Valery Montpellier 3, Univ Montpellier, Montpellier, France*

## 1. INTRODUCTION

Disturbances are an inherent part of social-ecological systems, which need to be able to cope with radical changes in order to persist. This capacity is called resilience and is related to the degree to which the system is capable of self-organization, learning and adaptation. In other words, resilience is defined as the capacity of a social-ecological system to deal with change and meanwhile continue to develop (Cumming and Peterson 2017). The already abundant research on this topic has resulted in seven generic principles that are important for enhancing the resilience of social ecological systems: maintain diversity and redundancy, manage connectivity, manage slow variables and feedbacks, foster complex adaptive system thinking, encourage learning and experimentation, broaden participation, and promote polycentric governance systems (Sterk et al. 2017).

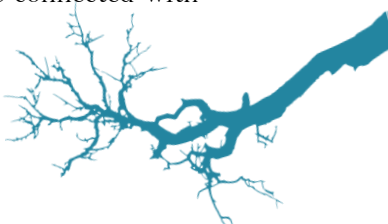
Farming systems are continuously evolving, with ongoing changing farmers-environment interactions, constrained and shaped by the social, economic and ecological setting in which they are embedded (Sterk et al. 2017). This is particularly the case for family farming in tropical humid regions, which are currently facing major challenges of adaptation to various changes at both local (e.g. declining fertility) and global scales (e.g. climate change, market price variations). Consistently with the seven principles, we have now robust scientific evidence that crop diversity contributes to the

resilience of small-scale farming systems by enhancing their capacity to adapt (Lin 2011, Altieri and Nicholls 2017). Farmers' access to propagules, i.e. all types of planting material, and to the knowledge required for their management is crucial for farmers' adaptation as it allows them to (i) maintain the agrobiodiversity in their cropping systems (Coomes et al. 2015) and (ii) keep their farming practices and strategies evolving in relation with the context (Darnhofer et al. 2010, Duru et al. 2015, Altieri and Nicholls 2017) and in response to changes such as climatic ones (Labeyrie et al. 2021b, Ruggieri et al. 2021). Farmers' access to these material and immaterial resources is hence a pillar of the resilience of small-scale farming.

Previous research highlighted the relevance of studying relational networks to understand how farmers' access to propagules and knowledge and highlight the factors influencing this access to support an agrobiodiversity-based agriculture (Almekinders and Louwaars 2002, Labeyrie et al. 2021a) and hence enhance farmers' capacity of adaptation and resilience (Tomich et al. 2011, Rockenbauch and Sakdapolrak 2017). Indeed, the network of relationships of different kinds (e.g., social, economic) in which farmers are embedded is an important source of propagules and knowledge in small-scale farming systems. The links that connect the different actors in these networks can facilitate or limit the circulation of these resources depending on their nature, and they thus condition the wider diffusion of resources within a rural community. Studying farmers' supply network is a critical issue in the case of highly diversified systems, such as agroforestry systems, the management of which is resource-intensive (Jacobi et al. 2017). Addressing this research gap requires to go beyond the dominant approach in propagules and knowledge circulation research that consists in focusing on either propagule (Wencélius et al. 2016, Abizaid et al. 2016, Ruggieri et al. 2021), or knowledge (Isaac et al. 2007), and also on a specific plant species (Kawa et al. 2013, Thomas and Caillon 2016, Labeyrie et al. 2016) or type of knowledge (Rockenbauch et al. 2019a). Jointly considering propagules and associated knowledge is crucial in order to better account for the complexity of agrobiodiversity dynamics.

Another point enacted by the above seven principles, is connectivity management (Sterk et al. 2017). The translocality, defined as "*the connectedness of daily life which is inter alia facilitated by multiple forms of mobility, including everyday movements, and seasonal and long-term migration*" (Brickell and Datta 2011, Rockenbauch and Sakdapolrak 2017), contributes to the resilience of rural communities, particularly in the face of climate and socio-economic changes (Adger et al. 2002, Black et al. 2011, Sterly and Sakdapolrak 2016). Indeed, translocal ties connect different types of communities, rural or urban, with distinct origins and agro-ecological histories, or even belonging to different social groups. These connections allow the circulation of resources, human, material and immaterial among zones and between farmers and other actors. This circulation locally contributes to the introduction of new propagules and knowledge, and thus to the evolution of rural landscapes and even to the adaptation to changes (Scheffran et al. 2012, Greiner and Sakdapolrak 2013, Mulyoutami et al. 2020). Some studies show that the adoption of innovations is favored in rural areas by farmers who are connected with





other geographically distant actors (Matouš et al. 2013, Wossen et al. 2013). In her study, Isaac (2012) highlights a positive relation between the plant diversity cultivated by farmers and their relationship with external rural organizations. Other studies show the influence of relationship types (e.g. kinship) and farmers' attributes (e.g. social status, farm size, expertise level) on their propensity to give seeds and transmit knowledge (Calvet-Mir and Salpeteur 2016, Abizaid et al. 2016) or to adopt innovation (Kiptot et al. 2006). Studying translocality in resource circulation networks thus allows to understand two aspects enhancing the resilience (Rockenbauch et al. 2019a) and, by analyzing the factors favoring the establishment of translocal ties, it is possible to identify what can contribute to the local development of innovations and adaptations based on agrobiodiversity.

However, research applying the concept of translocality to resource circulation and analyzing its role in the evolution of agroecosystems is rare. This kind of work requires paying attention to the spatiality of relational ties, the geographical origin of the actors and their context, and the factors favoring the establishment of translocal ties, i.e. the factors that explain the propensity of a farmer to move and be connected to external actors. The literature on translocality focuses mainly on the role of migrations, i.e. farmers who have experienced migration and brought back the knowledge gained from this experience (Rockenbauch et al. 2019a) or the case of seasonally migrant farmers (Isaac et al. 2014, Salpeteur et al. 2016). On the other hand, many studies have analyzed how farmers' attributes affect seed or knowledge circulation, such as ethnic and religious group membership (Matouš et al. 2013, Labeyrie et al. 2016), gender (Camou-Guerrero et al. 2008, Cadger et al. 2016, Abizaid et al. 2016) or household socio-economic characteristics (Kawa et al. 2013, Wencélius et al. 2016). Other studies also show the effect of socio-cultural characteristics of the community, such as matrimonial rules (Deletre et al. 2011, Wencélius and Garine 2014) or social organization (Labeyrie et al. 2014). These studies indicate that these different factors can either enhance or limit circulation over long distance depending on the local social rules, and we hence expect them to be important drivers of translocality in the circulation of propagules and knowledge. However, the effect of these factors on the establishment of translocal ties, and how this contributes to the evolution of agricultural systems has not been studied so far.

Here, we apply the conceptual framework of translocal social network (Rockenbauch and Sakdapolrak 2017) to the management of agrobiodiversity in a village of the east coast of Madagascar. This area is experiencing the development of agroforestry driven by the farmers themselves in response to various changes (e.g. population growth, declining soil fertility, development of cash crops, chapter 3: Mariel et al. Accepted). In this study, we first characterized the translocality in farmers' supply of propagules and knowledge related to three crops species with key roles in agroforests (banana, clove, vanilla), and identified the factors involved in the networks' characteristics. We tested a variety of hypotheses concerning the effect of different social attributes of farmers identified in the literature (age, gender, mobility, family origin, residence and lineage) on their propension to establish translocal ties for obtaining plants and knowledge. We then explored the role of farmers having

translocal ties in the circulation of propagules and in the diffusion of agroforestry practices within the village by testing how their propensity to establish translocal ties relates with their position in the studied networks. Our main discussion points revolve around the role of translocality in conjunction with other factors in the agrobiodiversity management, and its contribution to the resilience of smallholder farmers in the area. We draw perspectives on how the local modalities of access to knowledge and propagules should be considered to enhance the development of biodiversity-based resilient agriculture.

## 2. MATERIAL AND METHODS

### ♦Study site

The study was conducted in a village of Vavatenina District in the Region of Analanjirofo. The Betsimisaraka population living in this region has long lived on subsistence shifting rice cultivation (*tavy*) and with colonisation, they began to cultivate cash crops from the middle of the 18th century, first coffee and then clove and more recently vanilla (Danthu et al. 2022). While historically the development of cash crops was imposed through monospecific systems (Maistre 1955, Blanc-Pamard and Ruf 1992), many small-scale farmers started to cultivate these species in more or less diversified agroforestry systems (Petit 1965, Blanc-Pamard and Ruf 1992, Arimalala et al. 2019, Mariel et al. 2021a).

Agroforests are present on the hills and are locally called *tsabo*. In addition to cash crops, *tsabo* can be more or less rich in agrobiodiversity (estimated at more than 51 species, Mariel et al. 2021a) like fruit trees, timber trees, cassava, yams, or woody and herbaceous species growing spontaneously (Arimalala et al. 2019). Most of these species are self-consumed for their fruits, wood or leaves, and some also have agroecological functions (Mariel et al. 2021a). Many farmers also have a home garden, locally called *ambany trano*, where they grow mainly food crops, fruit trees and keep small pigs or zebu. Like most *tsabo*, *ambany trano* are very diversified and are important sources of agroforestry products. In *tsabo*, planting and maintenance of trees and weeding operations are mainly managed by men, while harvesting is a collective task within the family. Support for agricultural development in the Vavatenina area is rare and very uneven between communes: those that benefit the most are the communes close to the paved roads and the coast. Since Dandoy's study (1973), the studied village has not received any foreign visits or benefited from an agricultural development project. The Vavatenina city has an Agricultural Support Centre (CSA) that sells a few vegetable seeds, sometimes clove plants, chemical inputs and some tools.

In the perspective of giving better insight on the factors affecting translocality and their role in the local agroforestry dynamics, we chose a village for which an in-depth socio-economic, cultural and environmental description had been done in the 1970's (Dandoy 1973). This historical data was

useful to establish a frame of reference for describing the evolution of the situation and better understand what we observed in 2019. Betsimisaraka customs significantly condition daily life and social relations (Dandoy 1973; pers. obs.). Blood and marital affiliations are essentially based on strong ties of solidarity, trust, and reciprocity. These strong inter-individual relationships also exist over the family framework. To qualify them, the Malagasy use the term *fihavanana* which is not limited to this characterisation of relationships and is expressed more globally in the way people live. Gannon and Sandron (2006) have proposed a view of *fihavanana* that articulates the social and economic dimensions to show how the rules that derive from this social norm can constitute an obstacle to farming innovation.

### ♦Research framework

The studied networks were composed of farmers from the studied village linked to sources of knowledge and plants. The sources located outside the village were **translocal**, as well as the links between the farmers and the sources, and the ones located inside the village were **local** (Figure 7-1). The geographical aspects of the translocality of a source were defined based on the administrative division of the country (Region > District> Commune> *Fonkonatny*> Village). The sources were social entities or places associated to a social entity. We differentiated ***tantsaha***, i.e. country men and women whose livelihoods mainly depend on agriculture, and **non-peer actors** who were not *tantsaha* but involved in the agricultural sector through their economic activities. For the study, *tantsaha* and non-peer actors were categorized according to the type of relationship with the surveyed farmers and the presence or not of *fihavanana*. This local differentiation distinguished the **relatives** *(havagna*) and the **friends** (*namagna*) from relationships not based on *fihavanana*, such as an acquainted (but not well-known) *tantsaha* from the studied village (**villager**), an unknown *tantsaha* (**unknown**) or a **non-peer actor**. According to their role in supplying knowledge and propagules within the village, the surveyed farmers were classified as **central (or not central), local givers**, and as **translocal** if they were connected with a source from outside the village.

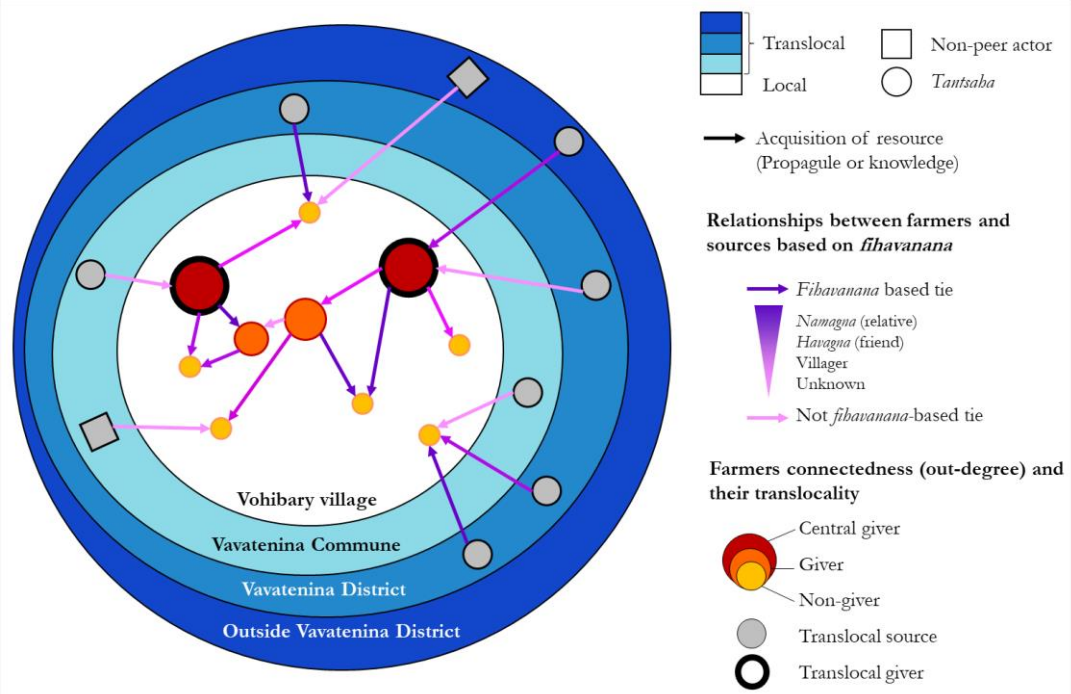



*Figure 7-1 : Conceptual network of translocal circulation of propagules and knowledge.*

### ♦Sampling and data collection

We applied a complete sampling method to 98 households of the studied village. This sample represented between 75 % and 82 % of the total number of households. The absence of a recent census of the village's population did not allow us to know the exact number of households. From a count of house roofs on a satellite image crossed with data provided by the village chief, we estimated a total number between 120 and 130 households. We excluded from the sampling the households that did not have *tsabo*. In the household, we asked the household head who was the person that makes most of the decisions concerning the management of *tsabo* and we conducted the survey with this person.

As we hypothesised differences in networks between "traditional" crops (cultivated for a long time by all farmers) and more recent crops, we focused on vanilla (*Vanilla planifolia*), clove tree (*Syzygium aromaticum*) and banana (*Musa* sp.). All farmers in the studied village had at least one banana and one clove in their *tsabo*, but not all grew vanilla. These crops are important as they contribute to the livelihoods of the households (Mariel et al. 2021a). We were interested in propagules, i.e. all types of plant materials used by the farmers for reproduction like seed, seedling or cutting. In the following, we will use "plant" to refer to planting material, i.e. crop propagules.

The plant networks of vanilla and clove were based on the first farmer's acquisition. They were asked the source of origin of the vanilla and clove when their first planted them in their *tsabo*. The banana plant network was based on the source of origin of the last two landrace acquisitions by the farmers, as this species is frequently planted to renew the plantations but not always with the same landrace. The knowledge networks concerned agroecological characteristics of the three-crop species

that farmers considered in their management practices (Mariel et al. 2021a). Clove-related knowledge was about the minimum and maximum age of entry into clove production and the factors causing variation. Vanilla-related knowledge is related to the most suitable and beneficial tree to use as a tutor and the associated reasons. Banana-related knowledge concerned the species on which banana had positive effects and the nature of these effects. These three knowledge domains can influence the way farmers manage plant species over space and time as they deal with potential issues regarding ecosystemic services. When asking these questions, we first identified the learning process involved in each case, i.e. a **transfer of knowledge between peers** (i.e. being taught by somebody else), **learning by mimicry** (i.e. observing what others do), **or learning by experimentation** (i.e. learning by doing) (Reyes-García et al. 2009, Baggio and Hillis 2018). When learning occurred through transfer of knowledge or mimicry, the interviewee was asked who was the individual who taught them or whom they observed.

We collected data on the cited sources of plant and knowledge: origin (e.g. *tsabo*, village, nursery, market), geographical location, and type of relationship with the surveyed farmers (Figure 7-1). In the case of kinship, we asked the precise affiliation and whether the person was still alive or not. For the plant networks, we also asked the type of propagule (e.g. seed, cutting, offshoot) and for the knowledge networks, the type of learning process. As previous studies indicate that the homophily between farmers is highly structuring the exchanges of seeds and knowledge (Camou-Guerrero et al. 2008, Labeyrie et al. 2014, 2016, Abizaid et al. 2016), in our study we tested the effect of farmers' age, gender, lineage and location (hamlet) on the way their acquire resources. We collected data on the interviewed farmers (age, gender, lineage that corresponds to a group of descendants over four generations in general) and the precise geographical origin of their parents and spouse. We also documented farmers' past mobility, i.e. whether they had moved out of the village in the past, if it was long-term migration in the past and/or a seasonal migration out of the studied village, and the motivations for that mobility. As we hypothesized a link between local vanilla planting and a mobility to Mananara District, which is an area close to our study site currently known for its high vanilla production, we also asked if and when mobility had taken place to Mananara. To better understand the role of some farmers in supplying plants and/or knowledge, we recorded information on their social status in the village (e.g. local and customary authority, elder), their engagement in a social group as a farming or cultural association, and we asked the person from the studied village whether they were considered to be an expert in vanilla and/or clove planting. Informal interviews with farmers and key informants enabled us to obtain qualitative information on the social organization within the village and farmers' perceptions on local changes in agriculture, Betsimisaraka culture and social relationships, and the drivers of these changes.

## ♦Methods of analysis

Description of the networks and their translocality

Our study focused on the circulation of knowledge and plants among actors, which entailed discarding the data on self-supply (ego ties) before conducting the analysis. Self-supply represented 43% of knowledge events with a higher proportion in the banana network (60%) and the clove network (61%), against only 8% in the vanilla network. The plant network consisted of 30% self-supply ties, unevenly distributed among the three species (banana: 51%, clove: 10%, vanilla: 11%).

The translocality of the six studied networks (3 species for each resource) was described based on their proportion of translocal ties and the geographical area they covered. We also described and compared the diversity of connections in the different networks base on two criteria: the translocality (local or translocal ties) and the type of relationship between the farmer and its plant or knowledge supplier (relative, friend, villager, unknown tantsaha, non-peer actor). This connection diversity was measured through three indices (richness, Shannon and Simpson index) calculated on R (R Core Team 2021, version 4.1.0, 2021-05-18) with the package vegan (vegan_2.5-7). The richness measures the number of different types of connections, the exponential of Shannon and Simpson indices are diversity measures that combine the richness of connections and the respective proportions of each type of connections. Shannon is known to be balanced, whereas richness puts too much weight on rare categories and Simpson, too much on abundant ones (Marcon 2015).

Analysis of the factors of translocality

We applied a generalized linear model method (GLM) on binomial data corresponding to the presence of a translocal tie or not for a given farmer, to test the effect of eight farmer-related variables (age, gender, lineage, mobility, hamlet of residence, and origins of father, mother and spouse) respectively for the knowledge and plants circulation (the three species being aggregated). The best model was chosen by AIC in a stepwise algorithm (Package STATS version 4.1.0) and the modalities of variables that predicted significantly the translocality were identified by comparing the pairs of modalities (package CONTRAST, version 0.24.1) at a threshold of 0,05 using R (R Core Team 2021, version 4.1.0, 2021-05-18).

Analyses of the links between translocal ties and farmers' connectedness in the village

The graphical display of the network with the open source software GEPHI (https://gephi.org/ ) was used to describe farmers' connectedness and to identify the farmers that played a central role in plants and knowledge circulation within the village. The nodes and the ties of the networks were first distributed with the "Force Atlas 2" spatialization type and secondly, we manually moved away the nodes corresponding to external givers according to a distance reflecting the three geographical scales of the translocality (Figure 7-1).





We tested whether farmers having translocal ties had a different position in networks as compared to those who did not have translocal ties. Without differentiating knowledge from propagule, we hence distinguished two groups of farmers for the analysis: those with translocal ties (hereafter "**translocal farmers**") and those without (hereafter "**local farmers**"). The network was composed of 46 translocal farmers (eight had three or more translocal ties) and 50 local farmers. We tested if these two groups of farmers differed in their **out-degree** in the village network**,** i.e. the number of ties through which the surveyed farmers give a resource to another. A farmer with a high out-degree is a **giver** of plants and/or knowledge within the studied village, more or less central depending on their out-degree value. We tested the link between the out-degree and the number of translocal ties by calculating a Pearson correlation (package CORRPLOT, version 0.92). In agreement with the conceptual framework of social network analysis, we excluded all translocal ties to define the studied village as our social network boundary. Our analysis also did not consider the case where the source of knowledge was a *tsabo* of the studied village without specifying the name of the farmer to whom it belongs. As we studied past sourcing, we considered sources that corresponded to dead farmers at the time of the survey. We calculated the out-degree of the farmers on directed and aggregated networks, i.e. without differentiating the three species, by using functions from the package IGRAPH (version 1.2.7) on R (R Core Team 2021, version 4.1.0, 2021-05-18).

## 3. RESULTS

### ♦Description of knowledge and plants networks and their translocality

Description of the knowledge and the propagules acquired

The farmers reported obtaining exclusively offshoots of banana and cuttings of vanilla liana, while for clove they mainly reported obtaining seedlings (77 %) and few seeds (23 %) (Figure 7-2). The large majority of exchanged plant material came from cultivated plots: offshoots of banana were collected mostly from *tsabo* (87 %) and ambany trano (12 %), seeds and seedlings of clove only came from *tsabo*, and cuttings of vanilla mainly came from *tsabo* (83 %). Farmers reported more different places of origin for this species than for the others (e.g., nursery, market, while crossing other villages on the paths). Fourteen banana landraces were recently acquired and two accounted for 43 % of acquisitions.

Related to the studied knowledge domains, the main responses regarding the best tutor for vanilla were *Pachira aquatica* (45 %), *Jatropha curcas* (27 %) and *Gliricidia sepium* (21 %). For the clove tree, 61 % of the farmers reported that its age of entry into clove production varied according to the type of soil, and 17 % said that there was no variation. The farmers' responses on the banana-related knowledge showed that 27 % reported that banana had positive effects on coffee trees (*Coffea canephora*), 17 % on yam (*Dioscorea* sp.) and 16 % on *Albizia stipulata*.




*Figure 7-2: The different types of propagules that circulate in the network: (A) an offshoot of banana carried in a basket, (B) vanilla cuttings hanging on a bamboo stick, (C) seeds of clove tree, (D) and (E) seedlings of clove tree in a farmer's nursery set up in his tsabo.*

Translocality of knowledge and plants networks

The ties in the knowledge circulation network corresponded mainly to peer-to-peer transmission (63 %) and mimicry (37 %). The network including the three species consisted of 161 ties, 75 % of them were established between farmers within the village studied and 25 % were translocal (Figure 7-3). About 12 % of the ties occurred with individuals from five different villages of the Vavatenina Commune and the main town (Vavatenina). 5 % of the ties occurred with individuals from two other communes belonging to the same district, and lastly, 8 % with individuals outside the District, and among these 13 events, 11 concerned Mananara.

The vanilla knowledge network differed considerably from that of banana and clove, as 33 % of ties reported by farmers for this crop came from outside the village (N= 87), against 16 % for banana

(N= 37) and 14 % for clove (N= 37). The proportion of ties coming from Mananara area was also much higher for Vanilla (10 %) than for clove (2 %) and Banana (2 %).

The plant circulation network including the three species consisted of 250 ties, 83 % of these ties were established between farmers within the village and 17 % were translocal (Figure 7-3). 13 % of the ties occurred with 13 different villages and the main town of the Vavatenina commune. Only 5 % of the ties occurred with individuals from localities of the Vavatenina District and outside the District, and none from Mananara. The proportion of translocal events differed between species, with vanilla network having a higher proportion of translocal ties (31 %, N= 58) than both clove (3 %, N= 87) and banana (20 %, N= 105) networks.

Although the circulation of resources for the three species was mainly local in the village, the knowledge network had more translocal events than the plants network (respectively 25 % and 17 %). The knowledge network was characterized by a higher frequency of translocal ties over long distances as 13 % of the events were from outside the Vavatenina Commune against only 5 % in the case of the plant network. Plant and knowledge networks had three villages of the Vavatenina Commune in common.

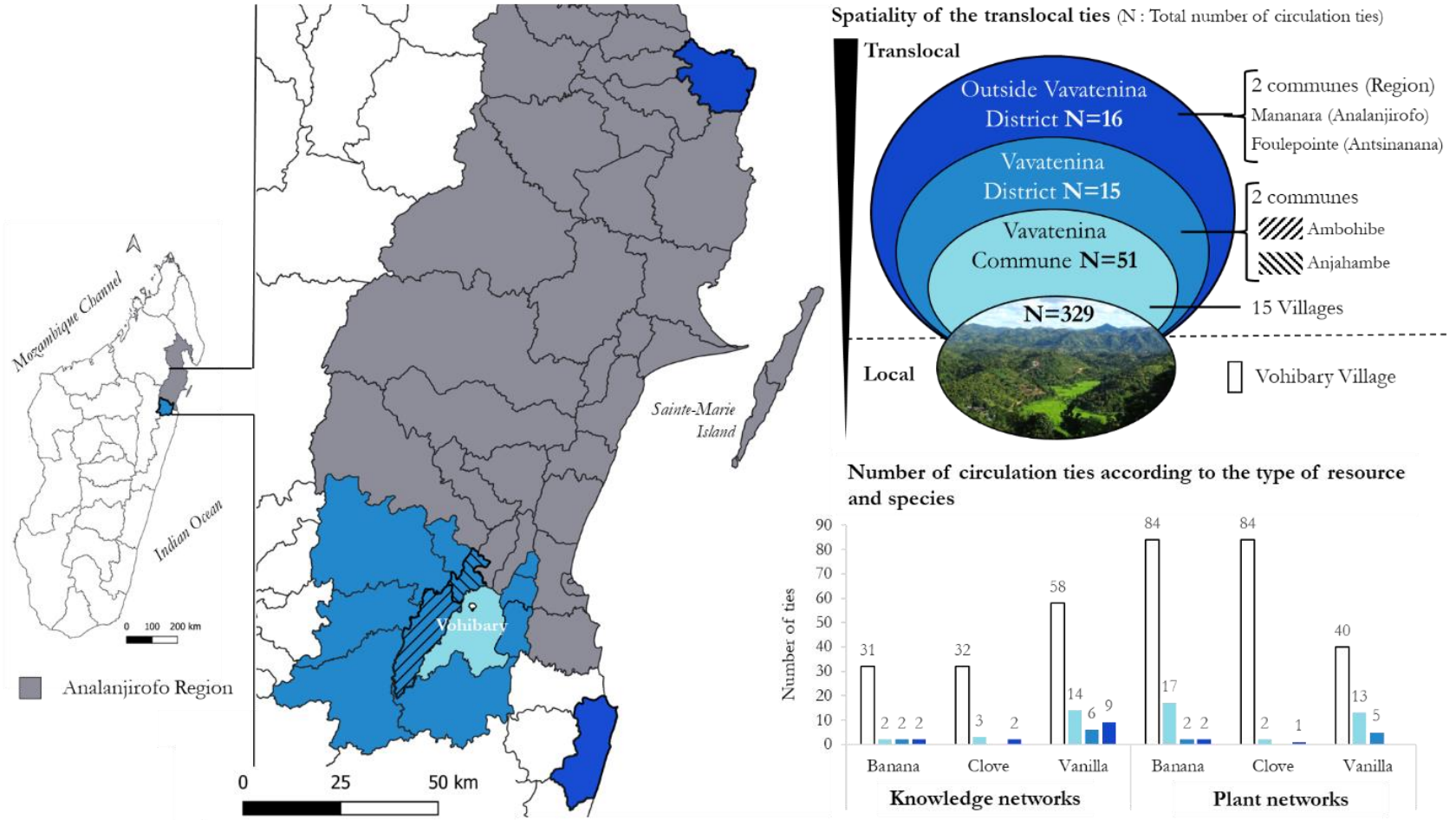



*Figure 7-3: (A) Geographical location of the study site and the different translocal scales involving circulation ties of plant or knowledge. (B) Total number of ties according to the local or the different translocal scales. (C) Number of translocal and local ties according to the type of resources (knowledge, plant) and the species (banana, clove, vanilla). N : Number of circulation ties.*

### ♦Nature of the sources of plant and knowledge and of the relationships involved

Knowledge networks and differences between species

In the knowledge network of the three species, ties with relatives accounted for 45 % of the ties in the network, ties with friends for 12 %, ties with unrelated villagers for 34 % (i.e. with whom the interviewee have no particular relationship), ties with totally unknown individuals for 7 % and ties with non-peer actors for 2 % (employer in the vanilla plantations, CSA, former agricultural extension worker, Figure 7-4.A). The high proportion of ties with unrelated villagers (45 % of local ties) was due to the high proportion of learning events through observation of the *tsabo* belonging to other villagers. When considering only the translocal ties, their proportions were balanced between relatives, friends and unknown individuals (32 %, 30 % and 30 %), and rare ties with non-peer actors were reported (8 %).

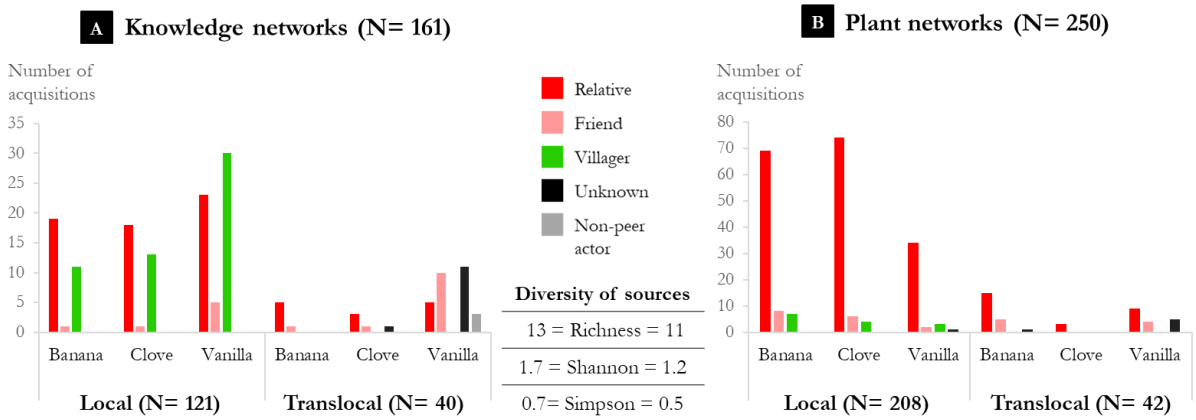



*Figure 7-4: Number of propagule and knowledge acquisitions according to the translocality, the species (banana, clove, vanilla) and the nature of the relationship between the farmer and the source according to the presence of fihavanana. Shannon: commonly between 0 and 5, the higher the index, the greater the diversity. Simpson: the closer the index is to 1, the more homogeneous the set of sources in the network is.*

Differences in the proportion of the different types of relationship mobilized for accessing knowledge were observed between species. The network of vanilla particularly differed from that of the other species. Indeed, the frequency of knowledge ties established with unrelated villagers within the village (24 % of local ties) and that of translocal ties established with friends (25 % of translocal ties) and unknown individuals (28 % of translocal ties) were much higher than in both the clove (respectively 11 %, 2,5 %, 2,5 %) and banana networks (respectively 9 %, 2,5 %, 0 %), for which ties with relatives were more frequent. Furthermore, the vanilla knowledge network was the only one to include non-peers.

The description of the different types of kinship relationship involved in knowledge circulation showed that the father accounted for 66 %, followed by maternal relatives (11 %) and paternal ones (7 %) (Figure 7-5.A). The maternal relatives were grandfather or uncle and concerned only men-farmers.

The paternal relatives were grandfather, uncle and cousin. The translocal ties were mainly reported with the father (85 %) and the other 15 % with maternal relatives. When comparing the three species (Figure 7-5.B), the networks of clove and banana had only translocal ties established with the father whereas the vanilla network had also translocal ties with maternal relatives. This same network had a lower proportion of local ties with the father (53 %) than the network of clove (67 %) and banana (68 %).

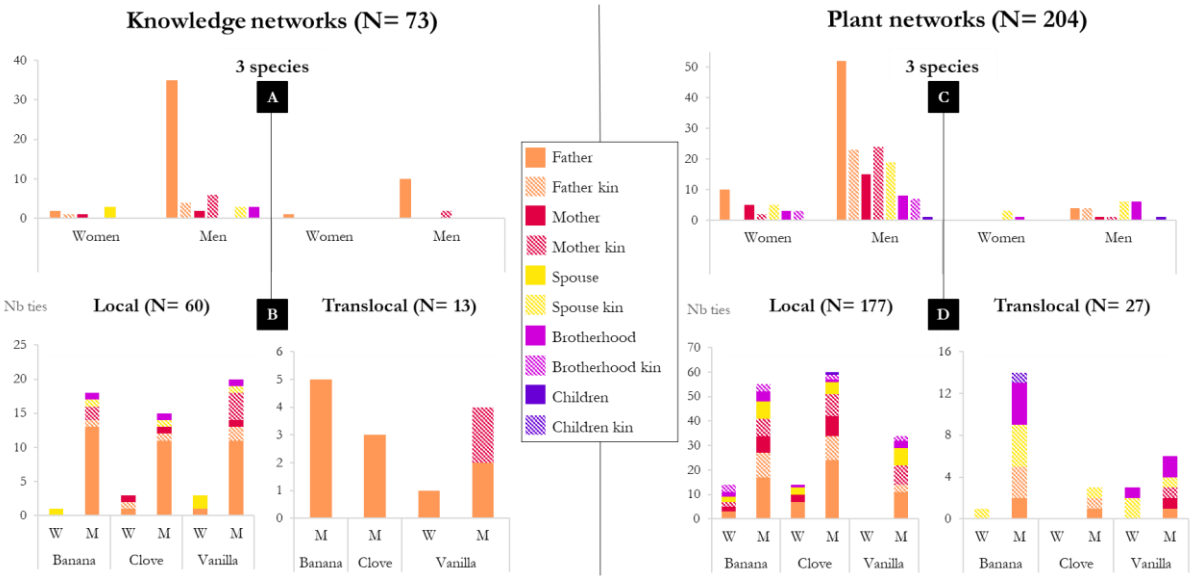



*Figure 7-5: Number of propagule and knowledge acquisitions according to the translocality of the acquisition, the gender of farmers and the kinship between the farmers and the sources, in the case of the three species are aggregated species (A) or considered separately (B). M = Men, W = Women.*

Plants networks and differences between species

In the plant network of the three species, ties with relatives accounted for 82 %, ties with friends for 10 %, ties with unrelated villagers for 6 % and ties with unknown individuals for 2 % (Figure 7-5.C). The proportion of ties with friends was higher in the case of translocal ties (12 %, N= 42) than of local ties 8 %, N= 208). A comparison between the three species did not show significant differences whatever the translocality of the ties.

Concerning the diversity of ties with relatives, the father represented 32 %, followed by the spouse relatives (16 %), both father and mother relatives (13 %), the mother (10 %) and the brotherhood (8 %) (Figure 7-5.C). The translocal ties established with relatives (N= 27) were more spouse relatives (53 %) and brotherhood ties (47 %) than the local ties (N= 177) that were mostly with father (35 %). The translocal ties of women-farmers were only spouse kin and brotherhood. When comparing the three species (Figure 7-5.D), the network of vanilla was the only having translocal ties established with mother and maternal relatives, and was the only without local ties established with the mother.

Differences between plant and knowledge networks

Relatives were more givers of plants (82 %, N= 250) than of knowledge (45 %, N= 161). The knowledge network of the three species presented a higher proportion of unrelated givers (9 %) than the plants network (3 %). When considering only the translocal ties, friends were more givers of knowledge (30 %) than of plants (21 %). The network diversity indices measured showed that the knowledge network had the higher richness, Shannon and Simpson indices, which means this network had more different types of sources (givers) than the plants network (Figure 7-4).

The proportion of ties with farmers' father or its family was higher in the knowledge network (73 %, N= 73) than in the plant network (46 %, N= 204) (Figure 7-5.A and C). The proportion of ties with farmer's mother or its family, wife and brotherhood was higher in the plant network (respectively 24 %, 13 % and 14 %) than in the knowledge networks (respectively 15 %, 4 %, 4 %). The spouses (wife or husband) contribute to the local circulation of plants but only their respective family (e.g. spouse's father and mother) contributes in the translocal circulation.

### ♦The factors affecting translocality

The Table 7-1 shows the proportion of farmers for each modality of the seven variables tested in the GLMs. Among the 59 farmers having experienced a long-term past mobility, 29 % went to Mananara: they were only men and especially under 35 years old (19 % of these men). Among these farmers who went to Mananara, seven did not reported any translocal tie and the other 10 reported between one and three translocal ties. Considering all farmers with a mobility (N= 65), half did not report any translocal ties, and 29 % had one translocal tie. A mobility to Mananara was mainly associated with harvesting cloves (13 farmers) and less with a work in plantations of vanilla. The other seasonal and long-term mobilities were mainly associated with working and the majority of these were related to agriculture (rice fields, sale of zebus, harvesting) but they were also construction workers or miners.





*Table 7-1 : Distribution of the sample of farmers (N= 98) in relation to the seven variables tested in GLMs. [1]lasy is house that is not located in the heart of the village but in the surrounding area. [2]At the time the survey.*

| Variables tested in GLMs | Modalities and proportion of the sample (N= 98) |
|---|---|
| **Gender** | **Men: 82 %**<br>Women: 18 % |
| **Age [19-77 yrs old]** | **Age <35: 44 %**<br>36≤ age < 55: 22 %<br>55≤ age: 34 % |
| **Place of residence** | **Main hamlet: 58 %**<br>Secondary hamlet: 42 %<br>*Lasy*[1]: 6 % |
| **Lineage** | **Lineage B: 32 %**<br>Lineage To: 21 %<br>Lineage M: 16 %<br>Lineage Ti: 13 %<br>NA: 18 % |
| **Parents' origin** | **Both parents from the studied village: 39 %**<br>Father from the studied village: 66 %<br>Mother from the studied village: 61 % |
| **Spouse's origin** | **From Outside the studied village: 20 %**<br>From the studied village: 37 %<br>No spouse: 13 % |
| **Mobility** | **Long-term past mobility: 60 %**<br>Seasonal mobility[2]: 19 %<br>No mobility: 34 % |

The effect of the seven variables on the frequency of translocal ties in knowledge and plant networks estimated using GLMs is presented in the Table 7-2. These results indicated a tendency that farmers' propensity to establish translocal ties for accessing knowledge was predicted by the gender and the origin of the farmer's father (*p*-values close to the significance threshold of 0,05; Table 7-2). More specifically, being a man seemed to favor the establishment of translocal ties (but this result should be considered with caution as women are under-represented in our sample) and having a father from the village appeared to impede such ties. For the plant network, the establishment of translocal ties was significantly predicted by the age of the farmers at a threshold of 0,05 with a positive relation between a translocal tie and being over 55 years old (*p*-value = 0,0298 with Age between [36; 55 [ and *p*-value= 0,0065 with Age < 36 years old). Interestingly, the mobility of farmers was not significantly related to their propensity to establish translocal ties for accessing plants or knowledge, and it was also the case for the place of residence, the lineage, the mother's and the spouse's origin.





*Table 7-2 : The results of the GLMs presented correspond to the best model obtained by backward procedure for the 2 networks (Knowledge and Plant). Significativity are concluded at a threshold of 0,05. *: p-value < 0.001 '***', < 0.01 '**', < 0.05 '*' and < 0.1 '.'*

| Network | Variable | LR Chisq statistic | Degrees of freedom | *P*-value |
|---|---|---|---|---|
| **Knowledge** | Gender | 3,4723 | 1 | 0,06240 . |
| | Father's origin | 3,4729 | 1 | 0,06242 . |
| **Plant** | Age | 8,4714 | 2 | 0,01447 * |

### ♦Farmers' connectedness in the village networks and their translocality

The section below describes the links between the translocality of the farmers, i.e. if they are translocal or local farmers, and their connectedness, i.e. if they are a central giver, a giver or a non-giver (Figure 7-1). First, for both networks, the calculation of the correlation between the numbers of translocal ties and the out-degree did not show a significant correlation (knowledge network: corr = 0,16 and *p*-value = 0,2085; plant network: corr = 0,1 and *p*-value = 0,2614).

Farmers' connectedness in the knowledge network and their translocality

Among the 96 surveyed farmers within the knowledge network, 82 % were non-givers, meaning they were never cited by other farmers as sources of plant or knowledge and among them, and 30 % were not connected with another farmer from the village. These non-connected farmers within the village network corresponded to two farmers who only acquired knowledge from outside the village, 10 farmers who only acquired knowledge by observing the *tsabo* of a villager but did not specify its name (they did not appear in the network of the Figure 7-6) and 17 farmers who acquired knowledge in both ways. The surveyed farmers also reported sources of knowledge corresponding to deceased elders (N= 16) and farmers who were not surveyed (N= 2) (Figure 7-6).

Focusing only on the surveyed farmers, the knowledge network had only one central giver (f24, out-degree= 16). He was a 60-years old man-farmer with translocal ties who acquired the knowledge of the best vanilla tutor from a friend living in Vavatenina town and purchased a cutting of vanilla from the market of the same town. He transmitted knowledge only related to vanilla and did not diffuse knowledge for other crops, and mostly gave cuttings of vanilla. He gave these resources to relatives, friends and villagers. This farmer has been assigned 74 times as a vanilla plantation expert and 3 times as a clove plantation expert. He was also appointed president of the local association to strengthen the security of vanilla producers against theft. His mother came from the studied village but his father and his spouse originated from a locality of the Vavatenina Commune. He did not experience seasonal mobility or migration. The knowledge network has 16 surveyed farmers with an out-degree equal to one or two (named "giver") and among them seven had translocal ties because they acquired the knowledge of vanilla from outside the studied village or had translocal ties related

to an acquisition of propagule. These seven givers with translocal ties mainly transmitted knowledge of vanilla. The three farmers connected with a non-peer actor were neither a source of knowledge nor a source of plants in the village.

Considering the other givers reported by the farmers, the network presented three givers with a high out-degree. One of them (out-degree= 7) has been assigned 15 times as an expert in clove planting and once for vanilla planting. He is the main Tangalamena of the village, i.e. the customary authority who manages conflicts and presides over both traditional Betsimisaraka ceremonies and religious ceremonies. With an out-degree equal to four, two deceased elders were givers of knowledge: they were parents of surveyed farmers to whom they transmitted their knowledge.

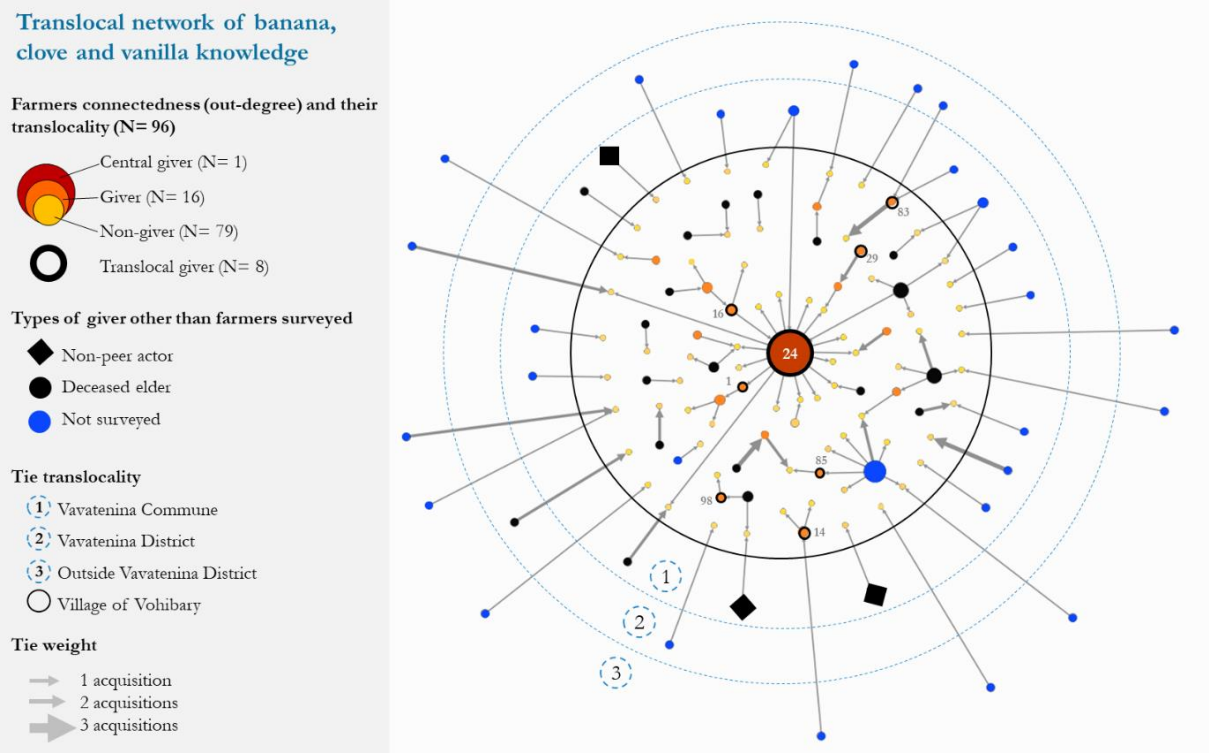



*Figure 7-6: Visualization of the translocal network of banana, clove and vanilla related knowledge.*

Farmers' connectedness in the plant network and their translocality

Among the 96 surveyed farmers within the plant network, 72 % were non-givers and, among them, 3 % were not connected with another farmer from the village because they were only connected with sources of plants from outside the studied village. The surveyed farmers also reported sources of plants corresponding to deceased elders (N= 30) and farmers who were not studied (N= 23) (Figure 7-7).

Focusing only on the surveyed farmers, the plant network had the same central giver as the knowledge network (f24), and four other central givers. Only one of them had translocal ties (f35). He

was a 50-years old man-farmer who established a translocal tie to acquire the vanilla knowledge from a friend living in a locality of the Vavatenina district. He gave exclusively offshoots of banana to villagers and relatives. He lived in a *lasy* next to an alembic used by the villagers to distillate clove essential oil, which open the opportunity for many villagers to get banana offshoots. The three other central givers were the village chief (f38) and two old villagers who gave a lot of planting material to their large number of children (f26 and f53). Among the 24 remaining surveyed givers in the plant network (out-degree=1, 2 or 3) 11 had translocal ties. Four farmers acquired a vanilla cutting, four an offshoot of banana and the three others had a translocal tie related to an acquisition of knowledge.

Considering the other givers reported by the farmers (but not surveyed), the network presented two deceased elders who had transmitted plants to both their children and grandchildren (out-degree= 11 or 8) and the same *Tangalamena* as the knowledge network (out-degree= 7).

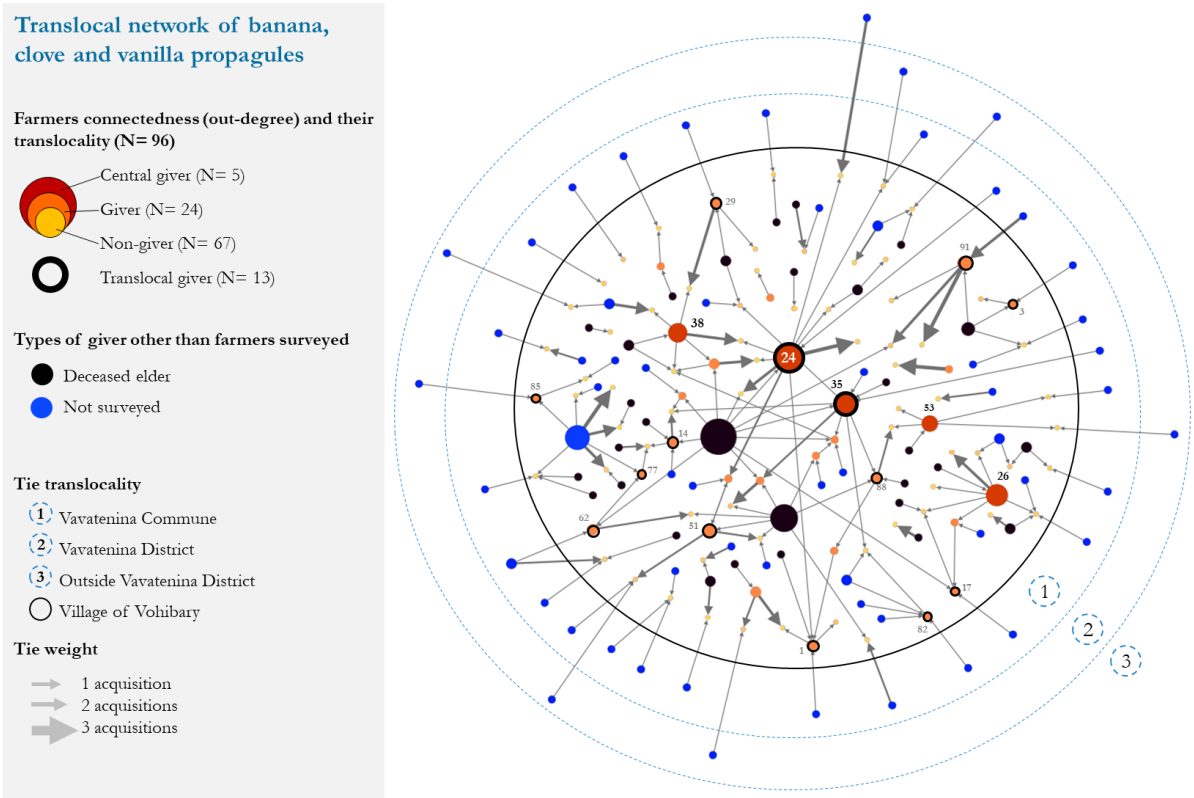



*Figure 7-7: Visualization of the translocal network of banana, clove and vanilla propagules.*

Differences between plant and knowledge networks

The knowledge network had more farmers who were not connected with other farmers from the village (respectively 30 % and 2 %) and more farmers who were never cited as providers than the plant network (respectively 82 % and 72 %). However, there were more givers who were not surveyed or deceased in the plant network (respectively N= 2 and N= 16) than in the knowledge network (respectively N= 23 and N= 30). Both networks had two central givers in common: one farmer

surveyed (f24) and another one who was not (f8). The knowledge network has only one central giver compared to the plant network (five central givers), therefore it is more centralized.

## 4. DISCUSSION

Our study shows that translocal ties play an important role in the access of Betsimisaraka farmers to the planting material of three key crop species in agroforests, and to the knowledge associated to their management. When analyzing the type of relationship driving translocal ties, we found that translocal ties are not necessarily induced by farmers' mobility, while this factor is the most studied in the literature on translocality in social networks (Sterly and Sakdapolrak 2016, Rockenbauch et al. 2019b). Our analysis of farmers' connectedness within the knowledge circulation network of the village shows that almost a third of the farmers is not connected with others (because they rely exclusively on translocal ties and self-supply), and that the others rely on a single or a very small number villager for accessing knowledge, in particular for vanilla related knowledge. In the propagule network, we rather found that several farmers contribute in the circulation of propagules. Through these results, our study opens new perspectives for imropving our knowledge on the role of translocality in the resilience of agricultural systems, by analyzing the contribution of translocal ties to farmers' access to biological and immaterial resources for managing agrobiodiversity in their *tsabo*.

### ♦Patterns of local and translocal circulation of plants and knowledge

Peers and fihavanana-based ties reveal the importance of trust to access plant and knowledge

The surveyed farmers rarely obtained resources from actors other than their peers, such as development organizations or agricultural extension services. This was only observed for obtaining vanilla cuttings or associated knowledge, with a few farmers citing external factors such as the extension services in Vavatenina (CSA, Agricultural Services Center). The scarcity of interactions with the CSA may be linked to its dysfunction and its lack of means to provide services and agricultural equipment to remote villages (pers. obs. and Dandoy 1973). Apart from the sale of propagules and tools, the CSA is expected to provide training and farming advice. However, the Malagasy government does not provide sufficient technical and financial means to maintain these kinds of activities. Another explanation can be attributed to the way the administration has been interacting with the farmers during the colonization (Dandoy 1973), and the way this relationship has evolved afterwards (Aubert et al. 2003). Indeed, the coercive aspect of the administration's actions, in particular to demand taxes and to repress the practice of shifting cultivation (*tavy*), had strongly imprinted farmers' minds and did not foster trust relations between the decentralized state bodies in rural areas and their population, limiting the adoption of the techniques and equipment they proposed (Dandoy 1973, Aubert et al. 2003). Our study therefore corroborates these previous observations concerning the limited role that development organizations may have had in agroforestry dynamics, whereas their role in the

dissemination of new practices has been reported in other areas experiencing agroforestry dynamics (Isaac et al. 2007, Isaac 2012, Cadger et al. 2016).

As shown by many network studies on farmers' access to plant and knowledge (Kiptot et al. 2006, Calvet-Mir and Salpeteur 2016, Labeyrie et al. 2016), we observed that kinship is the main type of relationship mobilized by the farmers to acquire resources for managing banana, clove and vanilla species in their *tsabo*. In the literature (Rockenbauch and Sakdapolrak 2017), this type of ties is also called "strong ties" (in our case fihavanana-based ties) as they are built on strong trust and solidarity, two important characteristics of social relationships for strengthening social capital (Qurniati et al. 2017, Galaso 2018) and enhancing resilience (Kresna 2021). This is supported by the answers the farmers gave to the question of who they trusted most in their daily lives, as 80 % of the farmers answered kinships (unpublished results). By reporting that peer farmers and fihavanana based-ties were the primary types of social relationships to acquire resources, our study is in line with previous ones which revealed the importance of trust in relational network, and thus underlines the issue of considering it for strengthening agroforestry innovation by relying on local modalities of access and considering changes (Saint Ville et al. 2016, Qurniati et al. 2017).

The transmission of plants and propagules over generations

The Malagasy people place the family at the heart of many concerns and decisions: they rely on it above all in case of need (e.g. installation of a young household, climatic or economic hazard), and consider it strongly in their farming strategies (Dandoy 1973, Tilghman 2019). For instance, a way of building a legacy for future generations is to maintain and enrich agrobiodiversity by renewing and diversifying it. Therefore, *tsabo* and ambany trano the framers inherited are rich and easily accessible sources of propagules. This explains that many farmers are self-sufficient, particularly for species who have a high multiplication rate such as banana. The high proportions of farmers acquiring knowledge from relatives are supported by farmers' reports: "*we must track our parents because we see in their tsabo the results of their framing practices*" (M.) and because "*our parents are the ones with the most experience*" (M.V). Vertical transmission is known to be central in rural societies around the world, and its plays a key role in their local adaptation (Reyes-García et al. 2009). Through displaying both inheritance of plants and vertical cultural transmission of knowledge, our results indicate that the relationship between parents and their children in Betsimisarka communities have a key role in conserving agrobiodiversity and associated knowledge.

Factors related to translocal ties establishment

Contrary to previous observations in other areas (Sterly and Sakdapolrak 2016, Rockenbauch et al. 2019a), we found that farmers' mobility is not a significant factor in their propensity to establish translocal ties. In the case of the knowledge network, it is rather the gender and the geographical origin of the father that explains the translocality. The gender effect can be related to the fact that it is mainly men who carried out the plantations in *tsabo* and thus who learn through their experiences,

observations and exchanges with others men-farmers. However, this result shall be examined with precautions because of the low proportion of women in our sample. The negative effect of having a father originated from the studied village on the propensity of farmers to establish translocal ties can be explained by the central role of the father in the transmission of knowledge that we also highlighted. Most of the surveyed farmers had their father in the studied village, from whom they have inherited their local knowledge, while those who did not had their father in the village tend more frequently to establish translocal ties.

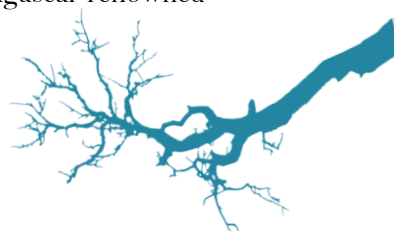
In the case of the plant network, we showed a positive relation between having over 55 yrs old and establishing a translocal tie. This result can be related to the temporality of the acquisition as we have documented the source corresponding to the first time the farmers planted the crop. This can be explained by the fact that when this older generation of farmers started planting, propagules were perhaps less present in *tsabo* in the village as the expansion of diversified agroforests is fairly recent and there were mainly coffee monoculture in the 70's (Dandoy 1973, Blanc-Pamard and Ruf 1992). When they started farming, older farmers hence had to look for propagules outside from the village, especially for vanilla that was scarcely cultivated at this time. Over the course of their lives and generations, they have multiplied these propagules and thus increased the pool of resources locally available to future generations. As farmers favor the self-sufficiency of propagules at the household or village levels, the younger generations tend less frequently to establish translocal ties to acquire propagules as compared with their elders.

Overall, most of the translocal ties are associated with relatives. This kind of circulation underlines the strong link the farmers maintain, be them man or woman, between their place of residence and their place of origin. Traditionally, the matrimonial system of Betsimisaraka culture is based on patrilocality, i.e. it is the wife who moves to the husband's home village (Dandoy 1973). Our study shows a more complex system in which both wife and husband move, sometimes in the father's home village and other times in the mother's home village. The case of farmers with a father from another locality shows that they settled in their mother's native village, and farmers with both father and mother from outside settled in their wife's native village. In any case, the lands the farmers have inherited in their native village are sources of propagules and knowledge. Thus, any mobility to visit family creates an opportunity for the farmer to acquire plants or knowledge from this place.

<u>The work mobility, an opportunity to have access to novelty</u>

While our study did not find a significant relation between farmers' mobility and translocality, work mobility does create opportunities to discover different farming practices whose associated knowledge and plant materials can then be brought back to the village: half of the farmers who had a work mobility established a translocal tie. The example of vanilla knowledge is very illustrative of the role that mobility can have in introducing new knowledge. We show that the vanilla knowledge network has the higher number of translocal ties with Mananara, the region of Madagascar renowned





for its vanilla plantations. This interest of the Betsimisaraka in vanilla was already motivating "*seasonal migrations for the duration of an agricultural season*" in a "*territory of large-scale cultivation* [to] *harvest vanilla in the Sambava-Antala area*" located north of Mananara (Defos du Rau 1959). In our case, we note that what motivates the farmers to go to Mananara is not necessarily related to vanilla, as three went there to clear clove plantations and harvest cloves. Their stay nevertheless allowed them to observe how vanilla was cultivated so that they could do the same back in their home village. We also observe that almost a third of the farmers do not cultivate vanilla and that it seems to have spread recently over the study area, especially since the price boom in the early 2000's (Hänke et al. 2018, Chalmin and Jégourel 2019). Indeed, for 33 farmers among those who cultivate vanilla, we reported the date of their first acquisition of cuttings: the first dates back to 2000 and until 2007 there were only five acquisitions. Economic factors therefore remain a central aspect in farmers' strategies, both as a trigger for mobility and as a driver for changing practices and adopting new ones. Llopis et al. (2020) had already made this observation in the Maroantsetra District in north-eastern Madagascar: "*regarding the increase in cash crop prices, this factor was mentioned nine times as a reason for some well-being components being easier to satisfy at the present time*".

### ♦Relationship between farmers' translocal ties and their connectedness within the village

While almost half of the farmers have acquired at least one-time knowledge or propagule from a source outside the village, many of them do not have connections with other farmers within the village. This limited connectedness would rather limit the dissemination of external resources in the village and thus that of potential innovations (Isaac et al. 2007, Cadger et al. 2016, Rockenbauch et al. 2019a). However, diffusion within the village probably occurs largely through observation as many farmers reported imitating what they observe in the plots of other farmers, which is frequent in rural societies (Baggio and Hillis 2018). Farmers can therefore imitate an innovative practice coming from outside without having interacted with the person at the origin of this practice.

The role of observation and mimicry

In the literature (e.g. Kiptot et al. 2006, Isaac et al. 2007, Rockenbauch et al. 2019a), most of the studies on knowledge or advice networks of smallholders concern oral transmission, yet our study shows a significant proportion of knowledge acquired through observation and mimicry. Our results indicate that mimicry occupies an important place in farmers' learning of farming practices, as it represents more than one-third of the ties in the knowledge network, which corresponds to farmers reporting observing the practices implemented by other farmers in their *tsabo*. Indeed, by living continuously in interaction with their environment (Berkes and Usher 2000, Altieri 2004, Berkes and Berkes 2009), farmers develop practical and theoretical knowledge and therefore learn a lot about the management of agrobiodiversity by observing what is going on in their *tsabo* and in that of others. Our work therefore argues for a better consideration of knowledge acquired through observation and mimicry in network studies. However, documenting this type of relationship raises methodological

issues because farmers continuously learn by observing their peers, and it is sometimes difficult to attribute a given knowledge to one particular observation.

Regarding the best tutor to use for vanilla, almost a third of the farmers explained that they choose this species because "*many villagers use this species in the village*" (citation from several surveyed farmers). Through this result, we can identify two aspects described by (Gannon and Sandron 2006) in their study of the links between innovation and fihavanana. On the one hand, there is the propensity of farmers to do as the others do, in other words "not to behave differently from others" at the risk of being frowned upon by the community. On the other hand, there is the collective aspect of learning and the importance of social control: the weight of failure is greater than that of success. These two aspects can therefore seemingly impede innovation (Gannon and Sandron 2006).

The "local expert": leaders of agroforestry dynamics?

In thus study, we identified that "central givers" with a high outdegree play a key role in the dissemination of plants and knowledge in the village. We found that those central givers had a particular social status (e.g. village chief, Tangalamena), were the elders of their lineage, or were identified in the village as successful and skilled farmers. In our case, the social status corresponds to a customary authority associated to a strong involvement of the individual in social events, thus favoring opportunities for meeting and sharing knowledge with the villagers. This type of leadership in the circulation of plants and/or knowledge is often observed in rural communities (Kiptot et al. 2006, Thomas and Caillon 2016). Success in farming, which can be observed based on the harvested quantity, allows a farmer to become a "good example" (Rockenbauch et al. 2019a) and an "expert" in *tsabo* management. For most of the interviewed farmers, an expert is someone who "*has a nice tsabo*" who "*has a lot of productions*" because they "*take care of it a lot*". These "local expert" farmers represent key actors for the diffusion of new knowledge and practices (Valente 2005), especially indirectly through imitation. Local experts with translocal links can play the role of "translocal brokers" (Isaac et al. 2007, Rockenbauch et al. 2019a). One farmer explained that an expert is someone "*who has experiences from other villages*" (B.C) that is the case for the "local experts" we identified. In another context in Madagascar, Gannon and Sandron (2006) revealed that the practice of growing rice in rows, described as a technical innovation, has spread in the area mainly through mimicry, particularly in neighbouring plots "*around ours*". However, identifying key farmers in the circulation of resources is different from identifying innovative farmers. For Gannon and Sandron (2006), innovators are characterized by a lower aversion to economic and social risk, which may be related to specific characteristics such as age, level of education or the fact of having migrated. In-depth qualitative surveys would be relevant to better understand what defines an innovator in the village and who they are.

## 5. CONCLUSION

By considering jointly propagules and associated knowledge, our study brings insights on farmers access to resources needed for managing their agroforests and maintaining or developing agrobiodiversity. Our results show that translocal ties played a key role in the past for farmers' access to planting material of agroforestry species, especially for vanilla that was rarely cultivated in Vavatenina area in the past. Nowadays, translocal ties are less frequent because planting material is locally available as agroforestry has considerably expanded, and is mainly transmitted from parents to their children. In Vavatenina area, farmers' past connectedness outside the village and their ability to reproduce and multiply their crops in order to transmit them to their descendants hence appear to have played crucial role for agrobiodiversity dynamics in this area. Contrarily to propagules, knowledge is still obtained frequently through translocal ties, and from a broader range of sources, although vertical transmission from fathers to children is also important. The fact that farmers' way of learning is largely based on observation and mimicry allows the fast diffusion of new practices that farmers evaluate as successful. The combination of translocal ties that foster the introduction of new plants and knowledge, and of diffusion within the community through observation allows farmers to keep their agroecosystems evolving according to the context, and to adapt to changes. Our study therefore calls for further investigation of the role of translocality in agrobiodiversity management, particularly by analyzing its link with the diversity cultivated by farmers; and also, to better consider the circulation of knowledge through observation, which represents a significant part of farmers' learning processes.





## 6. RÉSUMÉ ET TRANSITION

**Résumé :** Dans ce dernier chapitre, je montre que l'accès des paysan.ne.s de Vohibary aux propagules et aux connaissances repose principalement sur leurs réseaux relationnels mais aussi sur de l'auto-approvisionnement et sur de l'auto-apprentissage. Les principales caractéristiques de ces réseaux de circulation sont :

- les liens qui connectent les paysan.ne.s avec leurs sources sont surtout des liens de parenté ;
- le père et les affiliations paternelles sont plus importantes que les autres liens de parenté ;
- les sources de connaissances sont plus diverses que celles de propagules. Cette diversité repose sur le type de relation sociale et sur l'origine géographique, avec en particulier plus de connaissances acquises :
    - auprès d'individus non affiliés avec les paysan.ne.s enquêté.e.s ;
    - auprès de sources exogènes et loin géographiquement de Vohibary.
- le réseau de propagules implique davantage de paysan.nes de Vohibary ;
- le réseau de connaissances concernant le vanillier est le seul à inclure des acteurs autres que des pairs.

L'utilisation du cadre de la translocalité a permis de mettre en évidence que l'occurrence d'un lien translocal n'est pas nécessairement induite par la mobilité des paysan.nes. Dans le cas de Vohibary et des espèces étudiées, la translocalité semble être plutôt liée à des caractéristiques socio-culturelles telles que : la transmission des connaissances, l'héritage et les coutumes matrimoniales.

L'analyse de la connectivité des paysan.ne.s montre des différences claires entre les deux réseaux étudiés:

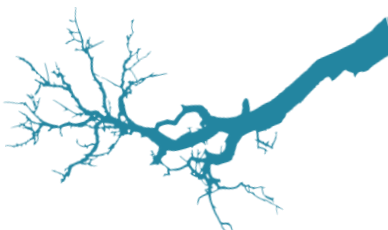
- Dans le réseau de connaissances :
    - une partie des paysan.ne.s n'est pas connectée aux autres du fait que ces personnes n'ont reporté que des liens translocaux et/ou des liens d'auto-apprentissage ;
    - une autre partie dépend principalement d'un seul villageois pour accéder aux connaissances, en particulier celles sur la culture du vanillier.
- Dans le réseau de propagules, les paysan.ne.s mobilisent plusieurs personnes du village, avec certaines qui donnent plus d'un type de propagule (surtout vrai pour les boutures de vanillier et pour les rejets de bananier).

En mettant en relation la position centrale de ces paysan.ne.s dans le réseau avec des attributs socio-culturels, je mets en évidence que ces personnes ont un statut particulier dans le village en lien avec le fait que :

- elles ont été désignées expertes en plantation de giroflier et/ou de vanillier ;
- elles détiennent une autorité coutumière ou administrative ;
- elles représentent les "anciens" pour les plus jeunes générations.

**Transition:** La dernière partie de ce travail est consacrée à une discussion générale de l'ensemble des résultats ainsi qu'aux limites et aux perspectives de recherches qu'ils soulèvent.







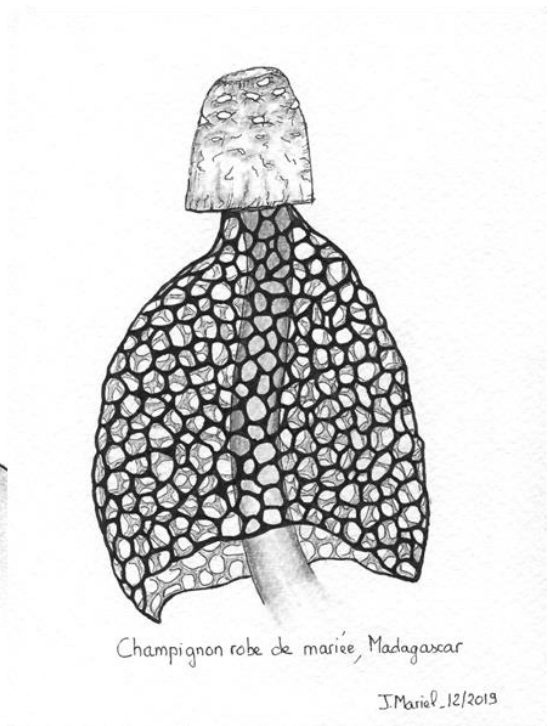
# Discussion générale et perspectives









# Chapitre 8 |DISCUSSION GENERALE

## 1. DYNAMIQUES DE L'AGROBIODIVERSITE ET DES PAYSAGES

Les paragraphes suivants visent à résumer comment mes analyses sur la composition des *tsabo* et des paysages, ainsi que ses déterminants socio-économiques et biophysiques ont permis de mieux comprendre les dynamiques agroforestières dans la zone de Vavatenina.

***

*"Avec le riz pluvial, le but c'est de désherber et pas vraiment de récolter" F.*

Cette citation d'une femme enquêtée traduit comment au cours des 50 dernières années le *tavy*, pratiqué pour produire du riz pluvial sur les *tanety*, a progressivement perdu sa place centrale dans l'agriculture des betsimisarakas (Kiener 1963, Rabearimanana 1988, Aubert et al. 2003). En raison de sa faible productivité liée à la baisse de la fertilité des sols, les rendements du riz pluvial ne permettaient plus de satisfaire les besoins d'une population croissante. Il a ainsi en partie perdu sa fonction première de production alimentaire pour celle de "nettoyage" d'une parcelle en friche ou en jachère avant qu'elle soit valorisée par d'autres cultures. Ces dernières comprennent notamment des cultures commerciales dont le développement sur la côte-est a commencé avec la colonisation qui marqua le début de la monétisation de l'agriculture familiale malgache (Gezon and Freed 1999, Mariel et al. 2021b). Une autre culture qui a fortement diminué est celle du caféier dont les récoltes, qui étaient auparavant destinées à l'export, alimentent maintenant surtout les ménages et les marchés locaux (Mariel et al. 2021b). Ainsi, le paysage de Vohibary ne comporte plus aujourd'hui de caféières sous ombrage telles que Dandoy les avait cartographiées en 1966. Celles-ci ont évolué vers des parcelles plus diversifiées associant les caféiers résiduels avec des girofliers, des arbres utilisés pour leur bois et des arbres fruitiers par exemple. Pour des raisons principalement économiques (Blanc-Pamard et Ruf 1992, Danthu et al. 2014), les paysan.ne.s de la zone de Vavatenina se sont progressivement tourné.e.s vers le giroflier, déjà bien implanté dans d'autres zones de la région Analanjirofo (Cocoual and Danthu 2018). A Vohibary, ces changements de pratiques se reflètent dans les modes d'usage des terres : les surfaces occupées par le giroflier, toutes conduites agricoles confondues, ont augmenté de 88 % entre 1966 et 2016. Cependant, la caractérisation des paysages de Vohibary et de Vavatenina a montré que les plantations de girofliers en monoculture, promue sous la colonisation, sont relativement peu présentes alors qu'elle l'ont certainement été durant certaines périodes (Cocoual and Danthu 2018). L'usage des terres qui domine aujourd'hui dans les paysages est l'agroforesterie qui couvre près de 25 % des terres de Vohibary, et 21 % de celles de la zone de Vavatenina (en considérant les agroforêts diversifiées et les parcs). Si cette place de l'agroforesterie est significative dans notre zone d'étude, elle est aussi probablement sous-estimée. En effet, la cartographie par télédétection a une précision limitée (cf. matrice de confusion dans le chapitre 4 : Mariel et al. En préparation) du fait que pour différencier

les occupations du sol entre elles, elle utilise les caractéristiques des pixels de l'image satellite (par exemple leur couleur, leur texture) ce qui rend difficile de distinguer des couverts arborés très diversifiés. Par ailleurs, la cartographie correspond à la capture d'un paysage dans un état et à un moment donné (cf. la Figure 8-1 qui montre l'évolution de la végétation entre 2013 et 2018 de quatre *tsabo* étudiés dans le chapitre 5). Mon travail a donc montré comment l'analyse des paysages et de leurs dynamiques permet de mieux comprendre des trajectoires de diversifications dans l'agriculture familiale en réponse aux changements, permettant ainsi d'appréhender les processus impliqués dans la résilience de ces systèmes agricoles.

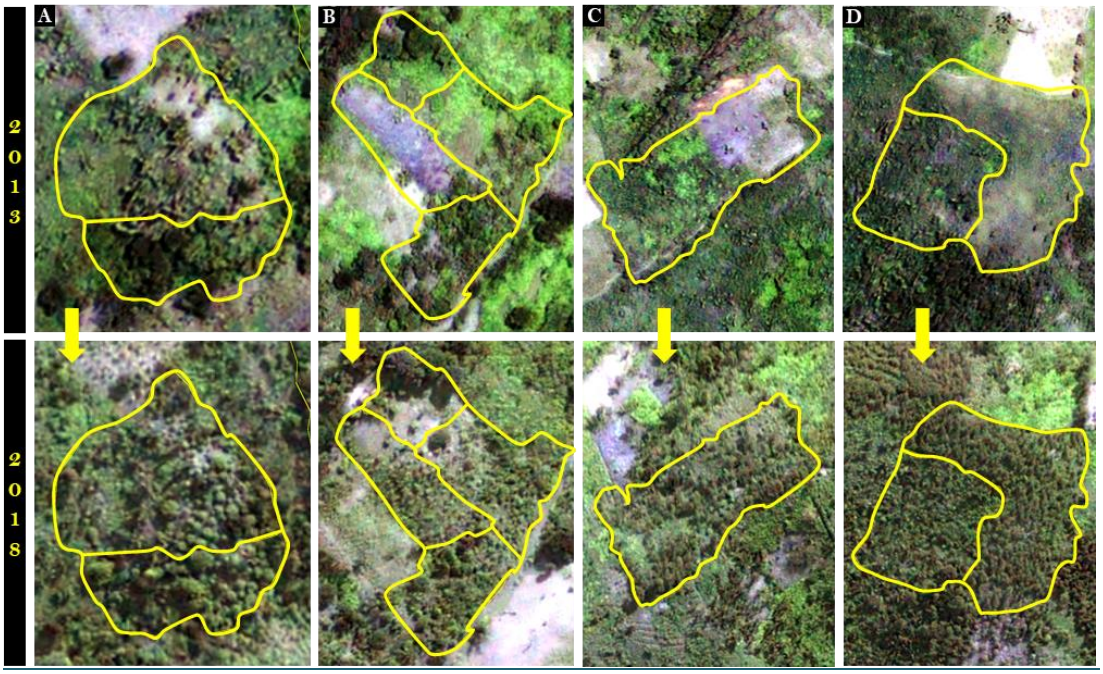



*Figure 8-1: Deux images aériennes, l'une acquise en 2013 et l'autre en 2018, de quatre tsabo (chapitre 5). L'évolution de l'occupation du sol des tsabo traduit la croissance de la végétation entre 2013 et 2018 et montre aussi la plantation d'espèces sur des sols qui étaient nus en 2013 (par exemple dans les cas des tsabo B, C et D).*

*" Aujourd'hui, les gens ont moins de surfaces donc ils mélangent tout sur la même" C.*

*"Avant, les gens plantaient moins de girofliers car le prix n'était pas intéressant" J.*

A l'échelle des *tsabo*, mon travail a mis en évidence que la diversification de l'agrobiodiversité se traduit aujourd'hui par la présence d'au moins 51 espèces dont plus des deux tiers sont des arbres, associés avec des espèces herbacées, des palmiers, des bambous et des lianes. Sur la base des espèces citées par les personnes enquêtées, je propose une estimation de la diversité des espèces végétales présentes dans les agroforêts locales (15 espèces en moyenne) et dans lesquelles des cultures comme le giroflier, le jacquier, le litchi et l'arbre à pain sont les plus observées. Mon analyse de la composition des *tsabo* a confirmé les changements dans la plantation de cultures commerciales en relation avec le contexte économique (Danthu et al. 2014, Jahiel et al. 2014, Llopis et al. 2020). Les paysan.ne.s connaissent en moyenne combien iels ont de pieds de girofliers (jeunes ou matures), de pieds de litchis et de vanilliers mais iels ne comptent plus leurs pieds de caféiers qui correspondent souvent à des arbres

résiduels issus d'anciennes caféières. L'abondance en jeunes girofliers non productifs (en moyenne inférieurs à 10 ans) nettement supérieure à celle en girofliers matures montre bien la tendance à la plantation de nouveaux arbres et aussi au renouvellement des anciennes plantations (Arimalala et al. 2019, Michel et al. 2021).

Dans les paysages de Vavatenina, les différentes occupations du sol reflètent aussi la diversification dans l'agrobiodiversité "planifiée", illustrée par exemple par la diversité des plantations de pérennes (agroforêts, parcs, plantations d'essences forestières), et elles révèlent par ailleurs la diversité correspondant à l'agrobiodiversité "associée", illustrée par les différents types de jachère. En étudiant les *tsabo*, certaines personnes ont cité la présence d'espèces fréquemment observées dans ces jachères (par exemple *Litsea glutinosa*, *Psiadia altissima* ou *Canarium madagascariensis*, Aubert et al. 2003, Styger et al. 2007) et dont certaines ont été inventoriées par Arimalala et al. (2019). Mes études de la composition des paysages et des *tsabo* ont ainsi révélé le *melting-pot* de biodiversité végétale géré par les paysan.ne.s dans les agroforêts et dans les paysages (Kull et al. 2013).

Mes recherches ont apporté des connaissances plus approfondies sur les dynamiques agroforestières de la zone d'étude, mais qui sont partagées par d'autres régions tropicales forestières (par exemple Fujisaka 1986, Aumeeruddy and Sansonnens 1994, Nath et al. 2020). Au-delà de ces dynamiques agraires et de leurs facteurs socio-économiques et environnementaux, la zone de Vavatenina partage avec ces autres régions une évolution des pratiques agricoles portée par les paysan.ne.s. Cette évolution a aussi impliqué celle de leur identité culturelle du fait que la culture sur abattis-brûlis était historiquement un trait culturel de ces sociétés rurales. Cette question a pu être appréhendée lors de ma dernière mission à Madagascar en questionnant les paysan.ne.s sur les espèces cultivées qui caractériseraient selon eux la culture betsimisaraka : toutes les personnes interrogées répondaient que c'étaient les cultures de *tanety*, les *tsabo*, et donnaient surtout l'exemple du caféier, du giroflier ou de la vanille, mais aucune n'a cité le *tavy*.

De manière sous-jacente à ces dynamiques agroforestières, mon travail a mis plus généralement en évidence que l'ensemble des *tanety* de la zone de Vavatenina sont aujourd'hui cultivées ou couvertes d'une végétation de type friche ou jachère qui traduisent qu'elles ont été cultivées à un moment donné, et la composition en espèces de ce type de végétation renseigne sur son âge (donc sur la date approximative à laquelle remonte leur dernière mise en culture, Styger et al. 2007). La composition des paysages de Vavatenina montre que ces différents usages des terres ne sont pas répartis de manière homogène. En effet, certaines zones sont actuellement surtout couvertes de jeunes jachères arbustives et peu diversifiées (carrés A et C, Figure 8-2) ou de jachères arborées plus anciennes (carré D, Figure 8-2), alors que d'autres zones sont majoritairement agroforestières comme le paysage de Vohibary (carré B, Figure 8-2). Cette répartition spatiale hétérogène permet ainsi d'appréhender l'histoire "locale" de ces dynamiques agroforestières dans la zone de Vavatenina. Il semblerait qu'elle soit notamment liée à un effet de l'expansion des zones d'habitation et de l'isolement relatif à la ville de Vavatenina. Ainsi, dans les zones isolées au sud-ouest, actuellement dominées par des jeunes

jachères, une hypothèse serait que les paysan.ne.s auraient arrêté plus tardivement le *tavy* pour la production de riz pluvial qu'à Vohibary. En parallèle, dans les zones proches des centres urbains et de la route goudronnée, le contexte socio-économique aurait favorisé le développement des cultures commerciales (Dandoy 1973) et celui de l'agroforesterie.

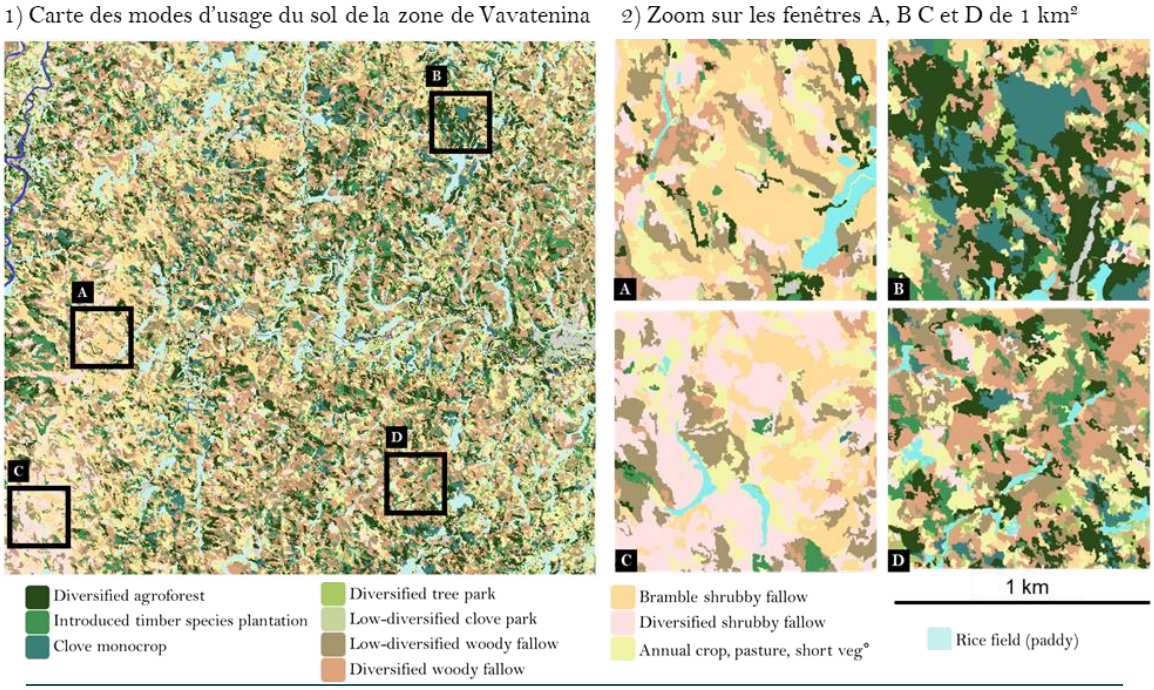



*Figure 8-2: (1) Carte d'occupation du sol de la zone de Vavatnina présentée dans le chapitre 4. (2) Zoom sur les quatre fenêtres A, B, C et D pour mieux observer l'hétérogenité de composition et de configuration dans les paysages de Vavatnina.*

En mettant en évidence ces dynamiques de diversification de l'agrobiodiversité, à l'échelle du paysage et du *tsabo*, et en discutant du développement de l'agroforesterie au regard de changements locaux et globaux, mes travaux soulignent la capacité d'adaptation des agricultures familiales (Thirion et al. 2014, Altieri et Nicholls 2017), qui est une composante essentielle de leur résilience (Folke et al. 2010, Sterk et al. 2017). Je résume et je discute par la suite comment mes recherches ont montré que cette capacité d'adaptation des paysan.ne.s repose sur l'agrobiodiversité et ses multiples contributions (Nature Contributions to People - NCP, Díaz et al. 2018) pour la population et pour les *tsabo*, et la manière dont iels la maintiennent et contribuent à son évolution aux différentes échelles spatiales.

***

*"Avec un tsabo, je suis rassurée de savoir que je peux avoir plusieurs récoltes, et que chaque année ces récoltes changent et peuvent me rapporter de l'argent" M.J.*

*"J'ai mis des grevilleas pour ne pas manquer de bois de chauffage car comme j'ai planté beaucoup de girofliers, je vais avoir besoin de bois" P.*

Dans leurs *tsabo*, les paysan.ne.s maintiennent une riche agrobiodiversité en raison de ses divers usages (alimentation, bois de construction, bois de feu, revenus par exemple) et de ses diverses fonctions dans l'écologie de la parcelle (Appendix 7). L'agrobiodiversité des *tsabo* est donc un moyen de diversifier les ressources sur lesquels reposent leurs moyens d'existence. Elle est aussi mobilisée pour ses effets perçus sur les conditions écologiques de la parcelle, notamment sur le sol (enrichissement, maintien de l'humidité) et la lumière (ombrage) (Appendix 7). L'hétérogénéité des paysages y contribue aussi car les jachères sont par exemple des sources de bois, de fruits et de diverses espèces herbacées utilisées pour l'alimentation des zébus ou la préparation de tisanes. Les autres systèmes de cultures que j'ai en partie cartographiés, comme les rizières, les champs de cultures annuelles ou les jardins de brèdes, comportent aussi une riche diversité à l'origine de l'essentiel de l'alimentation des populations betsimisarakas (riz, manioc, igname, patate douce, brèdes par exemple). Si la diversité variétale n'a pas été approfondie dans ma recherche, je l'ai appréhendée dans le cas du bananier en documentant ses réseaux d'approvisionnement dans le chapitre 7 (Appendix 7) et je l'ai aussi observée dans les *tsabo* dans les cas particuliers de l'avocatier, du manioc et de l'igname (Figure 8-3).




*Figure 8-3: Les photos A et B présentent deux variétés d'igname (*Dioscorea sp.*) : A est une igname* fotsy *(chair blanche) et B est* mena *(chair violette). La photo C montre des avocats de différentes couleurs. Les photos D et E correspondent à deux variétés de banane* Musa sp *: D est la variété* voantsiroko*, F est la variété* lahy *(*Musa paradisiaca*) (©J.Mariel).*

A partir de l'étude de la composition des *tsabo*, je montre que sur les 51 espèces, 31 fournissent des produits pour l'alimentation, 22 peuvent être utilisées pour leur bois, 12 peuvent être valorisées par la vente, 12 contribuent à enrichir la fertilité du sol, 11 ont un rôle dans l'ombrage de la parcelle et quatre dans le maintien de l'humidité. Par ailleurs, plusieurs espèces sont associées à plusieurs de ces six contributions (Díaz et al. 2018) : par exemple, le bananier et le caféier à cinq, le châtaignier de Guyane, le *Gliricidia sepium* et le jacquier à quatre (Appendix 7). L'agrobiodiversité dans les *tsabo* ainsi

que dans les autres unités du paysage fournit donc différentes contributions importantes dans l'agriculture familiale locale (Méndez et al. 2010, Kull et al. 2013, Reed et al. 2017). De plus, la redondance des espèces associées aux différentes NCP (e.g., différentes espèces destinées à la production alimentaire, de bois, à la génération de revenu) contribue à renforcer la résilience de ces systèmes (Sterk et al. 2017).

> *"Le* sapin *permet de faire du charbon et la vanille de gagner de l'argent rapidement" T.S*
>
> *"Ici on mange les fruits, le reste tombe et pourrit par terre. C'est difficile d'envisager de vendre car il y a peu de récolteurs" K.J.*
>
> *"Aujourd'hui, il y a du grevilléa dans tous les tsabo pour avoir du bois de chauffe et pour faire de l'ombrage" H. et E.*

La documentation des NCP associées à l'agrobiodiversité locale ont par ailleurs permis de mieux comprendre les dynamiques agroforestières décrites dans la section précédente. En effet, comme l'expriment les cinq citations ci-dessus, la composition des *tsabo* est en partie conditionnée par les contributions perçues par les paysan.ne.s, par le choix de maintenir ou d'enlever une espèce en fonction de leurs différents besoins et aussi pour s'adapter au contexte local, comme par exemple l'appauvrissement de la ressource en bois ou encore l'absence de filières de commercialisation pour la valorisation de certaines récoltes (Penot and Danthu 2019). En réponse aux changements et au cours du cycle de vie de l'exploitation, les paysan.nes adaptent leurs moyens d'existence et font donc évoluer l'agrobiodiversité (Gafsi 2017, Stroesser et al. 2018, Raimond et al. 2020b). Dans le cas de la zone de Vavatenina, les facteurs économiques et les changements affectant le sol ont eu des influences importantes sur les stratégies de diversification de l'agrobiodiversité.

Parmi les espèces qui composent l'agrobiodiversité, certaines sont maintenues au cours des générations en raison de l'importance des NCP qu'elles fournissent. Au contraire, d'autres sont moins cultivées et sont parfois abandonnées par les paysan.ne.s car le contexte socio-économique ou environnementale ne permet plus à ces espèces de fournir les NCP qui expliquaient en partie leur maintien dans les parcelles. Outre le caféier et le riz pluvial déjà mentionnés, beaucoup de paysan.ne.s ne cultivent plus de taro à cause du manque d'eau et d'une baisse de la fertilité (obs. pers). D'autres paysan.ne.s expliquent leur difficulté à garder certains arbres d'ombrage (*Albizzia* spp.) car ils meurent sous l'effet de changements du climat et du développement de champignons (obs. pers.).

Retracer l'historique de l'ensemble des cultures permettrait de mieux comprendre les dynamiques de diversification en fonction de l'évolution du contexte et des évènements majeurs (Raimond et al. 2020b). Cependant il est difficile d'évaluer depuis quand certaines espèces sont présentes dans la zone de Vavatenina et sont cultivées (Danthu et al. 2022). Il semblerait qu'au moment de l'étude de Dandoy en 1966, la diversité identifiée dans ce travail était déjà en grande partie introduite (mais partiellement décrite). Ainsi, ce qui a fortement changé depuis, c'est l'adoption et l'abandon plus

ou moins généralisés de certaines cultures, comme l'illustre le cas de la vanille depuis que son prix est très rémunérateur (Hänke et al. 2018, Llopis et al. 2020). Cependant, j'ai pu observer dans des *tsabo* localisés dans d'autres villages des cultures qui présument d'une arrivée plus récente (le colatier, le *ravintsara*, l'aloe vera, le cacao par exemple, Mariel et al. 2021b) notamment en lien avec des actions de développement local, des changements dans les régimes alimentaires ou des effets de "tendance" (obs. pers.). A Vohibary, la question se pose en particulier pour le *Grevillea robusta* qui est aujourd'hui largement planté par les paysan.ne.s, pour son bois et comme arbre d'ombrage, et qui selon eux est une plantation récente. Cette thèse appuie ainsi le fait que la diversification, qu'elle concerne la diversité végétale ou les NCP, et qu'elle se fasse à l'échelle de la parcelle ou du paysage, est un moyen pour les paysan.ne.s de répondre aux changements socio-économiques et environnementaux et ainsi de mieux gérer les risques (Carrière 2003, Lin 2011, Altieri and Nicholls 2017, Labeyrie et al. 2021).

Pour maintenir et faire évoluer cette agrobiodiversité en fonction du contexte, mon étude sur les modes d'accès des paysan.ne.s aux propagules de bananier, de vanillier et de giroflier montre qu'iels utilisent à la fois leur réseau relationnel et aussi leurs propres ressources. Ces dernières correspondent aux *tsabo* et aux *ambany trano* (jardin d'habitation) dans lesquels chaque plant peut fournir une ou des propagule(s) (boutures de vanille, graines de giroflier, rejets de bananier). Quand ces sources sont présentes, les paysan.ne.s les privilégient car elles sont faciles d'accès et leur "*qualité*[15]" est connue. Certaines personnes recherchent aussi à être auto-suffisantes, et à ne pas dépendre d'un tiers pour avoir une propagule, en se construisant leur propre pépinière de girofliers par exemple. Cette part d'auto-approvisionnement reflète aussi l'importance de la relation de confiance avec la source ; une confiance qui se trouve dans l'héritage que les paysan.ne.s reçoivent de leurs parents, notamment car cet héritage a porté ses fruits dans le passé (Badstue et al. 2002). L'analyse de réseaux a montré que les trois types de propagules étudiés circulent surtout au sein du cercle familial et dans le village, mais elles circulent peu entre le village et l'extérieur, et entre les personnes enquêtées et des acteurs autres que des paysan.ne.s. Cela signifie que les paysan.ne.s se tournent préférentiellement vers leurs proches par affiliation et leurs relations proches géographiquement pour avoir des plantes. Comme les *tsabo* et les *ambany trano*, ces pairs sources de propagules sont de confiance, et la proximité géographique crée plus d'opportunités de rencontres et donc d'échanges entre les paysan.nes. Par ailleurs, j'ai aussi mis en évidence que certain.ne.s paysan.ne.s ont une place plus importante que les autres dans la circulation de propagules au sein du village du fait qu'iels en donnent plus fréquemment. Ces personnes sont soit des parents de nombreux enfants, soit des experts désignés par les villageois.e.s ou soit des personnes respectées de par leur autorité coutumière (chef de village, *tangalamena*). Ces résultats corroborent le fait que la parenté et la confiance (liée à la nature de la relation sociale ou à la réussite) jouent un rôle important dans la circulation des propagules à Vohibary (Saint Ville et al. 2016, Qurniati et al. 2017, Rockenbauch et al. 2019a). En analysant les facteurs pouvant expliquer l'établissement d'un lien

[15] C'est le terme que les paysan.ne.s utilisent pour désigner un ensemble de caractéristiques liées notamment à son rendement et à la qualité organoleptique de ses produits.

translocal (c'est-à-dire avec l'extérieur du village, Rockenbauch and Sakdapolrak 2017), les résultats obtenus indiquent que la disponibilité en propagules au sein du village n'a pas toujours permis aux paysan.ne.s de s'approvisionner auprès d'un pair ou de le faire dans leurs propres parcelles, et a impliqué qu'iels aient eu recours à des sources extérieures à Vohibary. Je montre ainsi que les paysan.ne.s s'approvisionnent, d'une part, en reproduisant par eux-mêmes les espèces et en les transmettant aux futures générations et, d'autre part, en mobilisant leur réseau relationnel à la fois au sein du village mais aussi celui avec l'extérieur. Ces modes d'accès contribuent au maintien et à l'évolution de l'agrobiodiversité dans les *tsabo* et les paysages (Zimmerer 2003, Thomas et al. 2011, Pautasso et al. 2013, Samberg et al. 2013, Violon et al. 2016).

Les dynamiques agroforestières observées dans la zone de Vavatenina sont la résultante de changements dans les pratiques agricoles qui reflètent l'évolution des connaissances paysan.ne.s sur l'agrobiodiversité et sur ses interactions avec le milieu. Ces évolutions se sont faites progressivement au cours des 50 dernières années, sans l'intervention à Vohibary de projets de développement quels qu'ils soient, et via différents mécanismes d'apprentissage et de circulation des connaissances.

La section qui suit vise à montrer en quoi les pratiques à l'origine des dynamiques agroforestières observées façonnent des trajectoires de paysages qui renforcent la résilience de l'agriculture betsimisaraka. Elle discute également des contraintes liées à la diversification et aux enjeux que cela implique dans la perspective de soutenir ces dynamiques agroforestières.

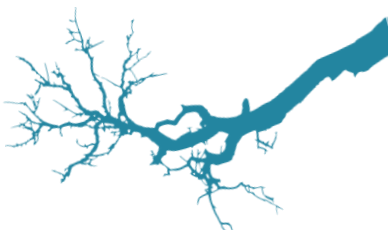
## 2. PRATIQUES DE GESTION DE L'AGROBIODIVERSITE ET RESILIENCE

Les premiers paragraphes de cette section résument les résultats obtenus sur les pratiques d'organisation de l'agrobiodiversité, à l'échelle du *tsabo* et du paysage, et visent à souligner comment au moyen de ces pratiques, les paysan.ne.s valorisent le milieu et font face à ses changements.

***

Cette analyse des pratiques d'organisation spatiale de l'agrobiodiversité dans les *tsabo* a mis en évidence que les espèces ne sont pas réparties et/ou associées de manière aléatoire. Cette gestion des espèces est raisonnée en fonction des besoins de la plante et des conditions du milieu qui sont liées à la fois à sa composante physique (sol, eau, lumière, microclimat) et à sa composante biologique. Cette dernière correspond aux espèces pouvant avoir un effet positif et/ou négatif, indirect et/ou direct sur le milieu physique et/ou une autre espèce. Ainsi, la manière des paysan.ne.s d'organiser l'agrobiodiversité leur permet de valoriser l'hétérogénéité spatiale du milieu, de réaliser des compromis entre les différentes contributions des espèces et de créer des synergies entre espèces en faveur de la diversification des parcelles et du paysage, et de leurs contributions aux paysan.ne.s (Méndez et al. 2010, Schroth et Ruf 2014, Remans et al. 2014, Reed et al. 2017).





Dans les *tsabo*, les paysan.ne.s valorisent l'hétérogénéité spatiale du milieu en mettant les espèces qui ne nécessitent pas un type de sol particulier (c'est-à-dire qui "ne choisissent pas" leur sol) dans les zones du *tsabo* où le sol est infertile. La topographie des *tanety* induit une hétérogénéité spatiale des conditions écologiques, comme l'ensoleillement ou le taux d'humidité, à l'origine de microclimats favorables à la croissance de cultures différentes. Ces effets de la topographie sont pris en compte par les paysan.ne.s dans leur manière de répartir l'agrobiodiversité par rapport à la pente. Ainsi, les cultures qui ont besoin d'ombre sont plutôt implantées dans la partie basse des *tsabo* et, inversement, celles ayant besoin de plus de soleil sont dans la partie haute.

La réalisation de compromis se traduit par exemple en plantant les cultures aux effets négatifs sur le sol et sur le giroflier sur les bordures de parcelle ou éloignées des autres cultures (par exemple le litchi, l'eucalyptus ou le bambou). Les synergies entre espèces s'observent dans les pratiques d'association : par exemple le giroflier avec le *Grevillea robusta* (Figure 5-7) ou la vanille avec son arbre tuteur (Figure 8-4, Appendix 9). Ces assciations reposent sur des connaissances relatives à l'ombrage, à la "fertilité" et à l'eau qu'apportent les espèces à la vanille et au giroflier. L'organisation de l'agrobiodiversité sous la forme de microzones résulte de pratiques qui prennent en compte à la fois les synergies et les antagonismes entre espèces (cf. ci-après) et l'hétérogénéité du milieu.

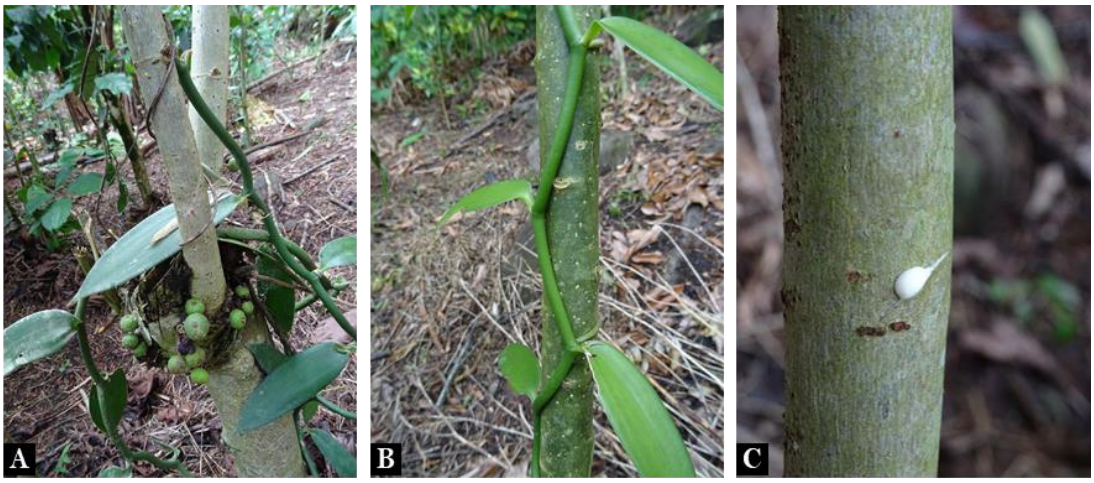



*Figure 8-4: Une liane de vanille tutorée sur un tronc de* Ficus *sp. (A) (car "ses fruits apportent de la fertilite" J.) ou de* Jatropha curcas *(B). (C) Substance produite par le* Jatropha curcas *et qui selon les paysan.ne.s enquêté.e.s explique l'effet positif de cette espèce sur la vanille (car "l'écorce apporte de l'eau aux racines [adventives] de la vanille quand elles s'accrochent au tronc" R.) (©J.Mariel).*

Cette thèse s'est consacrée à décrire principalement l'organisation spatiale des espèces alors que la succession de ces dernières dans le temps est aussi importante pour comprendre les processus de diversification (Jean-Denis et al. 2014, Gafsi 2017, Jagoret et al. 2018). Analyser les successions aurait conduit à s'intéresser de manière plus approfondie aux parcs, qui correspondent à une pratique agroforestière caractérisée par une plus faible densité d'arbres entre lesquels sont cultivées des espèces annuelles (Michon and De Foresta 1999, Torquebiau 2000, Carrière 2003). En effet, des observations que je n'ai pas inclues ici montrent que les parcs correspondent fréquemment à un des premiers stades dans le processus de diversification d'une parcelle dans laquelle sont présents initialement des arbres

cultivés au milieu d'une végétation buissonnante qui serait défrichée-brûlée avant d'être mise en culture. En effet, parmi les huit paysans (sur les 18 enquêtés dans le chapitre 5) ayant hérité d'un *tsabo* "abandonné" composé d'un mélange de végétation spontanée et d'arbres cultivés, six ont commencé la gestion de leur *tsabo* sous la forme d'un parc. Ainsi, dans le cas où des cultures annuelles seraient plantées en premier, la parcelle serait un parc (Figure 8-5.D qui montre une parcelle venant d'être défrichées et dont les arbres ont été épargnés par le feu). A Madagascar, seuls les parcs à girofliers ont été étudiés (Arimalala et al. 2019). Dans mon travail, leur présence dans les paysages a été identifiée par télédétection et j'ai également pu les observer sur le terrain, avec comme cultures annuelles du riz, des légumineuses ou du manioc (Figure 8-5.A, B, C).

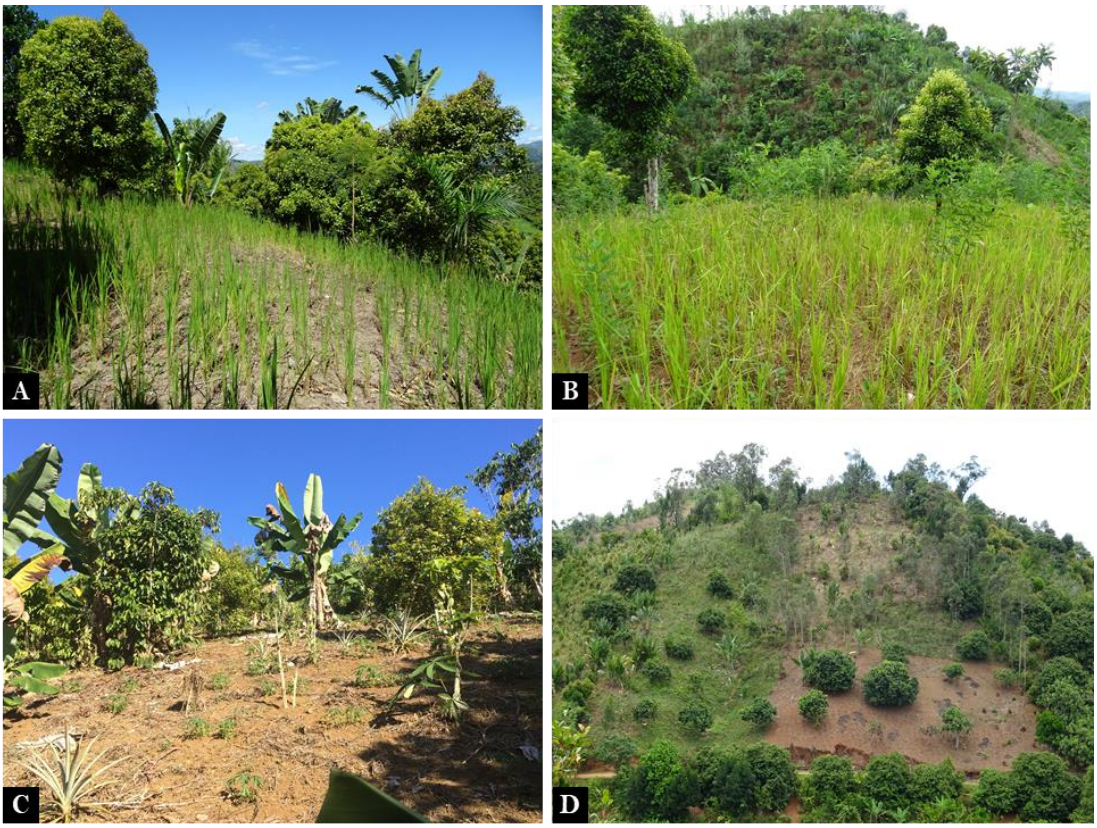



*Figure 8-5: Exemples de parcs associant principalement des girofliers avec du riz (A) et une variété de pois (B). (C) Parc associant du manioc, des ananas avec quelques caféiers et girofliers. (D) Versant de tanety comportant en bas à droite une parcelle dont le défrichage suivi du brûlis a épargné plusieurs litchis, des arbres à pain et des eucalyptus (©J.Mariel).*

Le travail d'analyse des paysages de Vavatenina a montré des relations étroites entre la topographie et la manière dont s'organise dans l'espace l'agrobiodiversité associée aux différents usages du sol (e.g. agroforesterie, jachère, pâturage, cultures annuelles). Cela montre comment les paysan.ne.s considèrent l'hétérogénéité du milieu biophysique dans leurs logiques d'intégration des systèmes de culture dans les paysages (Blanc-Pamard 1986, Velásquez-Valencia et al. 2019). Dans le cas de la zone de Vavatenina, ces logiques reflètent la vision holistique de la fertilité qu'ont développée les paysan.ne.s en vivant en interaction avec leur environnement et en intégrant dans leurs pratiques

agricoles ce qu'iels observent des interactions mutuelles entre l'agrobiodiversité et le milieu. L'organisation des paysages peut ainsi se décrire selon des tendances fortes dans la répartition des usages des terres selon la pente, l'altitude et l'orientation (Figure 8-6). Les terrains plats à basse altitude correspondant aux fonds de vallons sont principalement occupés par des rizières, et dans leur continuité, les bas de versants de *tanety* sont surtout occupés par des champs de cultures annuelles, des pâturages et des parcs. En remontant la pente, les monocultures de girofliers et les agroforêts diversifiées deviennent plus présentes et ce jusqu'à environ 450 m d'altitude. Des plantations d'essences forestières peuvent être observées le long de toute la toposéquence. Au sommet des hautes *tanety*, ce sont les jachères qui dominent. Ces dernières sont présentes un peu partout, aux interstices des espaces cultivés, mais sur les hauteurs et les fortes pentes ce sont les jachères arbustives et herbacées qui dominent. L'observation d'une *tanety* dans son ensemble révèle que les agroforêts, les monocultures et les plantations forestières se trouvent majoritairement sur les versants les moins exposés aux cyclones.

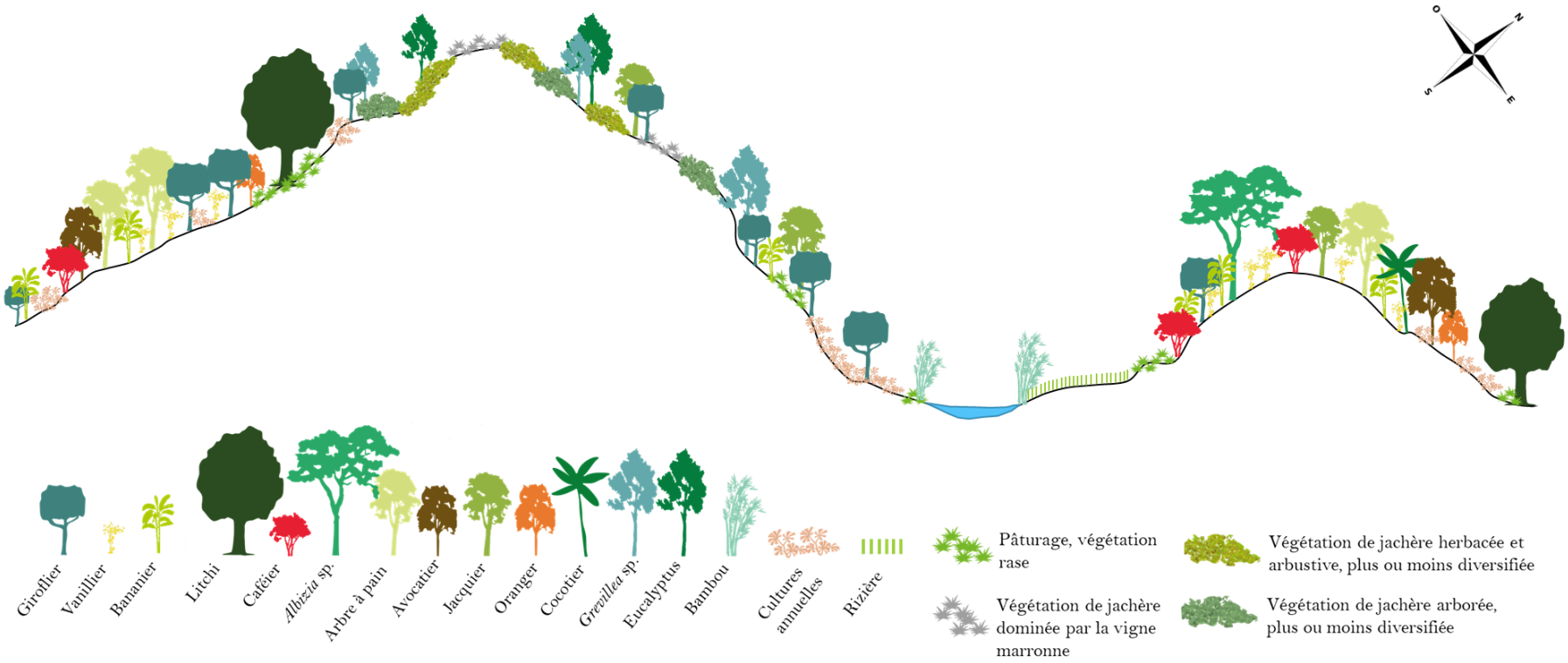



*Figure 8-6: Répartition schématique de l'agrobiodiversité le long d'une toposéquence des paysages de la zone de Vavatenina (graphisme ©C.Mariel).*

Mes travaux ont ainsi permis de mettre en évidence que l'hétérogénéité des paysages de Vavatenina résulte d'une gestion multi-échelle de l'agrobiodiversité (micro-zone, *tsabo*, paysage) et qui relève à la fois de la composition de l'agrobiodiversité mais aussi de son organisation. Mes résultats ont aussi permis de montrer que les déterminants de ces paysages en mosaïque sont entre autres liés aux conditions du milieu, aux différentes contributions de l'agrobiodiversité aux populations rurales, et à ses interactions avec le milieu. La section suivante vise à discuter dans quelles mesures, au regard du contexte local et des changement globaux, les modes de gestion locale de l'agrobiodiversité que j'ai décrits pourraient soutenir des trajectoires de paysages agroforestiers renforçant la résilience des paysan.ne.s.

***

Plusieurs résultats ont permis de mettre en évidence des caractéristiques inhérentes à l'agriculture locale, au contexte socio-économique et au milieu physique qui semblent favorables à la diversification, mais qui peuvent aussi représenter des obstacles.

*"Il y a plus d'animaux quand les parcelles sont proches de l'*atiala *(forêt naturelle)"* **C.V.**

En effet, l'agriculture familiale dans la zone de Vavatenina façonne des paysages agroforestiers en mosaïque contiguë qui pourraient contribuer au retour d'une biodiversité (Figure 8-7) permettant la restauration de certaines fonctions écologiques (Fahrig et al. 2011, Hillbrand et al. 2017, Duarte et al. 2018). La gestion de petites surfaces (majoritairement inférieures à un ha), typiques de l'agriculture familiale malgache, est à l'origine d'une fragmentation des terres du point de vue foncier, mais à l'échelle du paysage, cette fragmentation contribue à son hétérogénéité. Par ailleurs, l'agrobiodiversité "planifiée" et "associée" observée dans la plupart des parcelles crée un continuum au sein de la mosaïque qui permet de connecter les différents espaces du paysage, ce qui favoriserai la circulation d'espèces animales (Picot et al. 2007, Clough et al. 2009, Fahrig et al. 2011, Martin et al. 2012). Afin de mieux appréhender ces enjeux liés à la biodiversité, des inventaires floristiques et faunistiques dans les *tsabo* permettraient d'évaluer leur biodiversité et de comprendre comment cette dernière est impactée par les pratiques locales (Bhagwat et al. 2008, Clough et al. 2009, Velásquez-Valencia et al. 2019).




*Figure 8-7 : Exemples de différentes espèces animales et végétales, et d'un champignon ("robe de mariée") rencontrées dans la zone de Vavatenina (©J.Mariel).*

Outre des implications relatives à la biodiversité, mon travail a mis en évidence diverses pratiques agroforestières en faveur d'une régénération de la fertilité qui pourraient être mobilisées dans un tel objectif. Ces pratiques consistent notamment en la plantation d'arbres qui "fertilisent" le sol (Figure 6-6). Par ailleurs, la gestion des cultures sous la forme de micro-zones est une pratique qui permettrait de protéger les espèces d'éventuelles variations climatiques impactant leur croissance et leur production (Lin 2007, Lasco et al. 2014), d'autant plus qu'il est estimé que les températures à Madagascar pourraient augmenter de 1,1°C à 2,6°C à l'horizon 2050 (Tadross et al. 2008).

Mon travail a montré que les pratiques agroforestières ont une place importante dans la composition et la configuration du paysage. L'étude des connaissances sur les interactions positives et négatives avec le giroflier (Figure 5-7) et avec le vanillier (Appendix 9) suggère la possibilité d'un développement plus large de ces cultures commerciales reposant sur l'agroforesterie, car les espèces ayant des effets positifs sont plus nombreuses que celles ayant des effets négatifs. Promouvoir cette diversification et soutenir les paysan.ne.s déjà engagé.e.s dans cette stratégie permettraient de concilier un développement économique tout en considérant les enjeux de résilience et en mobilisant l'agroforesterie pour restaurer les paysages (Méndez et al. 2010, Hillbrand et al. 2017, Reed et al. 2017).

> *"Les gens sont pressés de planter pour gagner vite de l'argent et ils plantent mal, transplantent trop tôt les girofliers et les caféiers" B.*

> *"Les plantes meurent vite à cause du climat qui change" F.*

Les résultats de mon travail soulèvent aussi des enjeux relatifs aux contraintes associées à la diversification et qui pourraient freiner les dynamiques agroforestières en cours. En effet, la caractérisation des paysages de Vavatenina a souligné que le développement de l'agroforesterie n'était pas homogène dans la zone ce qui suggère la présence de facteurs locaux qui constituent des freins à l'adoption de cette pratique et à son développement (Shennan-Farpón et al. 2022). Des facteurs globaux, comme le changement climatique, la mondialisation ou le contexte économique (capitaliste, libéral) sont des pressions qui s'exercent sur les paysan.ne.s et qui peuvent les contraindre à une gestion de l'agrobiodiversité non choisie et non durable (cf citation ci-dessus). Mes travaux ont aussi permis de constater des différences entre les connaissances théoriques et empiriques qui reflètent l'existence de contraintes, individuelles ou liées au milieu par exemple. Ainsi, en étudiant la répartition spatiale des différents types de microzones selon la topographie (résultats produits en lien avec le chapitre 5 mais non publiés, Appendix 10), j'ai observé qu'il n'y avait pas de relation significative entre le type de micro-zone et leur localisation topographique. Cela signifie que quelle que soit la composition de leur agrobiodiversité, elles sont présentes sur toute la toposéquence même si, d'après les connaissances locales sur les interactions agrobiodiversité-milieu, certains endroits de la toposéquence sont décrits comme peu adaptés à certaines espèces (comme la vanille par exemple). Autrement dit, le besoin des paysan.ne.s concernant une espèce est souvent un facteur de choix plus important que l'adéquation des

conditions écologiques des *tsabo* à cette espèce. Ainsi, les moyens dont disposent les paysan.ne.s (main-d'œuvre, foncier, économies) sont des facteurs limitants, et induisent des compromis pouvant conduire à la mise en place de pratiques moins adaptées au contexte socio-économique et au milieu.

### 3. CIRCULATION ET EVOLUTION DES CONNAISSANCES

Cette section synthétise les différents résultats obtenus permettant de mieux comprendre le rôle que des mécanismes d'apprentissage et de circulation des connaissances ont pu avoir dans l'émergence et le développement de l'agroforesterie dans la zone de Vavatenina.

***

*"Ce sont les anciens qui apprennent aux jeunes" B. S.*

*"En suivant les traces des anciens, je me base sur des résultats concrets et je ne prends pas de risques" R.*

L'analyse des modes d'accès et de circulation de trois types de connaissances (concernant la gestion du giroflier, de la vanille et du bananier) a permis de mettre en évidence que les paysan.ne.s les ont principalement acquises auprès de leurs parents. Comme le soulignent les deux citations ci-dessus, ce processus de transmission verticale (Reyes-García et al. 2009) est à l'origine d'une part importante des connaissances paysannes acquises car elles reposent sur les résultats des expériences des parents (des "anciens"). Ces expériences, ponctuées de réussites et d'échecs, ont permis d'accumuler des connaissances (Berkes and Usher 2000) qui représentent des garanties pour les jeunes générations quand elles commencent à gérer l'agrobiodiversité de leurs propres parcelles.

*"Pour apprendre et comprendre il faut faire" A.*

*"J'améliore mes connaissances en faisant des expériences. Si je demande à des personnes j'aurai les mêmes informations car les gens se voient et s'observent entre tsabo" N.*

Cette même étude a permis d'appréhender ce mécanisme d'apprentissage par expérience (Foster and Rosenzweig 1995, Altieri 2004, Jankowski and Lewandowski 2017) en évaluant la proportion de connaissances acquises par les enquêté.e.s en observant les résultats de ce qu'iels pratiquent dans leurs propres *tsabo*. Si certaines personnes m'ont expliqué que, selon elles, les expériences étaient nécessaires "*pour être un agriculteur*" et que les connaissances héritées des parents constituaient un socle fertile pour débuter, d'autres personnes relatent : "*si je fais quelque chose de nouveau, de différent par rapport aux anciens, j'ai peur que ça meurt, que ça ne marche pas*". Dans le contexte actuel de pauvreté et de "*vie difficile*", la crainte de mauvais résultats dans les récoltes peut être un frein à l'expérimentation et l'acquisition de nouvelles connaissances pour développer d'autres pratiques pour lesquelles les paysan.ne.s n'ont pas de garanties (Gannon and Sandron 2006).

Par ailleurs, l'acquisition de connaissances auprès de pairs, apparentés (les familles de l'épouse, du père ou de la mère) ou non apparentés (par exemple les amis), a également été observée dans les réseaux. Ces deux modes de circulation par voie orale permettent la transmission de connaissances au cours des générations, leur diffusion au sein du village et contribuent à construire des visions partagées sur les interactions entre espèces, et entre les espèces et le milieu. L'étude des connaissances sur les interactions sol-agrobiodiversité a permis d'illustrer la construction de ces visions communes. Par exemple, j'ai mis en évidence que presque l'ensemble des paysan.ne.s ont répondu que les espèces *Albizia lebbeck* et *Albizia stipulata* fertilisaient le sol, or ces deux connaissances renvoient à des pratiques de culture du caféier remontant à la période coloniale (François et Ledreux 1929, Blanc-Pamard et Ruf 1992). L'introduction de ces connaissances est donc ancienne et ces dernières se sont conservées, voire modifiées au cours du temps, et se sont répandues au sein du village grâce à ces processus de transmission et de diffusion orale.

*"Je connais parce que je suis agriculteur" B.R*

La citation ci-dessus reflète comment en vivant en interaction avec le même environnement biophysique, les paysan.ne.s développent une vision holistique et collective des processus écologiques impliquant l'agrobiodiversité ; une vision à partir de laquelle iels construisent leur pratiques agricoles (Altieri 2004, Berkes and Berkes 2009). En documentant la classification locale des sols, cette étude a souligné une vision holistique au travers des conceptions de la fertilité du milieu (Blanc-Pamard 1986). Celle-ci ne se résume pas uniquement à la fertilité du sol (c'est-à-dire des propriétés physico-chimiques) mais embrasse plus largement un ensemble de caractéristiques du milieu (relatives à la lumière, la température, l'humidité et la localisation topographique) qui créent des conditions agroécologiques favorables à la croissance et à la production des cultures (chapitre 6 : Mariel et al. Accepté). Par ailleurs, en mettant en parallèle les descripteurs de la classification des sols avec les changements de sol observés, cette même étude a montré comment les connaissances paysannes évoluent, sont "actualisées" en intégrant les informations issues des changements observés, ici ceux d'une dégradation du sol et d'une baisse de la fertilité (Niemeijer and Mazzucato 2003, Berkes and Berkes 2009, Padonou et al. 2014).

*"Je suis cultivateur, j'observe ce qui se passe dans mon* tsabo *et aussi dans les* tsabo *qui sont au bord du chemin qui mène au mien" B.N.*

Mon travail a permis de conforter que l'observation est un autre mécanisme qui favorise le développement de nouvelles connaissances et plus généralement la diffusion entre paysan.ne.s. En effet, l'étude des réseaux de circulation des connaissances que j'ai menée a montré que l'observation représente une part importante dans les modes d'acquisition relatés par les personnes enquêtées. Pour ces dernières, l'imitation de pratiques observées dans les parcelles d'autres villageois.e.s est un moyen de développer de nouvelles connaissances. A Vohibary, cela a permis de répandre l'usage de certaines espèces d'arbres pour tutorer la vanille. Cette même étude a aussi souligné que l'observation et

l'imitation ciblent des pratiques qui inspirent et qui plaisent (*"j'observe chez les autres et si ça me plaît, je refais pareil*" H.) en raison de préférences personnelles ou des récoltes que permettent la pratique en question. Ces aspects joueraient le rôle de garantie à l'image de celui des connaissances que détiennent les anciens. J'ai ainsi montré, comme dans de nombreuses autres études de ce type, que la transmission orale et l'observation sont des mécanismes de la circulation des connaissances qui contribuent à la construction de visions partagées sur le milieu et l'écologie de la parcelle, et prennent part aux dynamiques agroforestières observées dans les paysages (Fujisaka 1986, Aumeeruddy and Sansonnens 1994).

*"Les jeunes font des pépinières, ce sont les étrangers qui leur ont appris" H.*

Par ailleurs, les *tsabo* du paysage de Vohibary ne sont pas les seuls à constituer des sources de connaissances. En effet, la mobilité géographique crée des opportunités de découverte de pratiques différentes de celles qui se font au village. Cela est illustré avec la connaissance concernant la vanille que plusieurs paysan.ne.s ont acquise en observant des plantations à Mananara. Si en apparence l'isolement géographique (relatif à la zone) est un frein à l'introduction de nouvelles connaissances, mes résultats laissent penser que la mobilité inhérente aux paysan.ne.s., qu'elle soit motivée par des raisons économiques ou qu'elles traduisent des traits culturels, permettrait de contrebalancer cela. Plus généralement, mes recherches confirment le rôle des connaissances exogènes (extérieures au village) dans l'enrichissement et l'évolution des connaissances paysannes. L'analyse de réseaux que j'ai effectuée a permis de quantifier cette proportion de connaissances venant de l'extérieur. De plus, l'étude sur les connaissances sol-agrobiodiversité offre des exemples d'hybridation avec ces connaissances exogènes qui ont contribué à l'adaptation des pratiques aux changements affectant le sol. Ce mécanisme d'hybridation peut être illustré par certaines techniques de plantation et d'emploi de fumier de zébus que la littérature citait en lien avec la culture du caféier (Blanc-Pamard et Ruf 1992) et que je montre être aujourd'hui utilisée pour le giroflier (chapitre 6 : Mariel et al. Accepté). Néanmoins, documenter précisément les origines des connaissances paysannes est difficile dans la mesure où elles proviennent souvent de plusieurs mécanismes à la fois d'apprentissage et de circulation (Jankowski 2014, Jankowski and Lewandowski 2017) et qu'elles sont influencées par divers stimuli des environnements écologiques et sociaux (Berkes and Berkes 2009). Ainsi, pour plusieurs techniques d'apport des sols en matière organique (par exemple l'usage de *zezika*, un mélange de végétaux compostés) ou de transplantation des girofliers (avant *"plantés directement au pied d'un arbre*", maintenant dans des pépinières), il est difficile d'évaluer les contributions respectives de connaissances exogènes, celles héritées des parents, celles transmises par des pairs ou encore celles développées par expérience.

*"Aujourd'hui, les jeunes veulent moins de traditions et plus de nouveautés apportées par l'extérieur" R.*

La citation ci-dessus permet de discuter de deux aspects observés à Vohibary et non approfondis dans ma recherche. Le premier concerne cette envie des nouvelles générations de

"s'extraire de la tradition" en s'intéressant davantage à la nouveauté, associée à des choses actuelles et observées à l'extérieur du village, qui est aujourd'hui favorisée par le développement de la téléphonie mobile, d'internet et des réseaux sociaux (obs. pers.). Si ce phénomène peut contribuer à l'acquisition de nouvelles connaissances et l'adoption de nouvelles pratiques, il soulève aussi la question de l'érosion des connaissances locales et traditionnelles (Reyes-García et al. 2005, Saynes-Vásquez et al. 2016, Brito et al. 2017). C'est ce second aspect qui est sous-entendu quand Blanc-Pamard (1986) écrit que "*il n'y a pas de perception sans pratique*" autrement dit : sans son application et son usage, une connaissance peut être perdue. A Vohibary, cela peut être observé dans l'évolution de l'emploi de certains termes associés à des pratiques moins fréquentes ou délaissées. Par exemple, j'ai pu constater que le terme de *savoka*, désignant la jachère arbustive entre deux phases de *tavy* (Dandoy 1973), n'était plus utilisé et ne renvoyait aujourd'hui à aucun usage du sol, alors que ce type de végétation est encore très présente dans les paysages de Vavatenina (Figure 4-4).

Les différents mécanismes relatifs aux origines des connaissances et à leur évolution favorisent donc le partage de connaissances entre paysan.ne.s et la construction de visions partagées qui reflètent la manière dont l'histoire collective du rapport des paysan.ne.s à leur environnement contribue à une unité culturelle, à un socle de connaissances communes. Dans ces mécanismes, les connections inter-individuelles et la nature des relations sociales jouent un rôle important (Boster et al. 1987, Crona and Bodin 2006, Bing 2018). Ces mécanismes permettent aussi aux paysan.es de développer leurs propres connaissances qui les différencient les uns et les unes des autres et qui sont à l'origine de la diversification et de l'enrichissement du pool des connaissances locales (Frake and Conklin 1962, Taylor 1984, Atran 1991). Cela se traduit par exemple par la présence de connaissances moins partagées et moins consensuelles (Figure 6-6).

Pour parvenir à une meilleure compréhension des facteurs influençant la distribution des connaissances, les méthodes quantitatives développées en anthropologie permettent d'analyser l'influence de caractéristiques individuelles ou de normes sociales sur la distribution de ces connaissances dans une population humaine (Reyes-García et al. 2007). A partir de modèles mathématiques, il est ainsi possible d'appréhender comment les individus se regroupent en fonction des connaissances qu'ils partagent (Romney et al. 1986, Borgatti 1998, Reyes-García et al. 2007, Anders and Batchelder 2015). Des travaux préliminaires réalisés par Théo Guillerminet (mais non présentés dans mon mémoire) visaient à explorer si dans l'échantillon de paysan.ne.s enquêté.e.s des regroupements se formaient en fonction des réponses qu'iels avaient données relativement à des connaissances sur les interactions sol-agrobiodiversité. En utilisant la méthode des Latent Block Models (LBM, Thomas et al. 2015) , il a montré que quatre groupes de paysan.ne.s se distinguaient. Ces résultats suggèrent que la distribution des connaissances n'est pas aléatoire et qu'il existerait des variables (par exemple des caractéristiques propres aux paysan.ne.s ou de l'environnement, Blanco et Carrière 2016) qui expliqueraient le partage ou non de ces connaissances au sein des groupes. Pour

poursuivre ces réflexions, des travaux sont en cours avec des membres du GDR ReSoDiv (Réseaux Sociaux et Diversité biologique).

Par ailleurs, en étudiant les réseaux, j'ai montré la présence de paysan.ne.s moins connecté.e.s aux autres villageois.es et de paysan.ne.s qui transmettais plus que les autres. Ces différents profils de connectivité ont été discutés en lien avec l'espèce considérée et certaines caractéristiques individuelles dans le cas des paysan.ne.s ayant une position centrale dans la circulation. Dans la littérature, des travaux mettent en évidence des liens entre la manière dont les individus sont connectés entre eux pour échanger des connaissances et/ou des propagules, et la distribution des connaissances (Kawa et al. 2013, Abizaid et al. 2016). Ainsi, les résultats obtenus via l'analyse de réseau soulèvent plusieurs questions : est-ce-que les individus centraux et ceux qui ont des liens translocaux ont des connaissances différentes des autres ? Est-ce que les individus très connectés partagent les mêmes connaissances entre eux ? Des éléments de réponses pourraient être apportés via un travail mettant en relation la position des paysan.nes dans les réseaux translocaux avec les connaissances qu'iels détiennent.

Ces travaux d'analyse des connaissances et de leur circulation ont donc permis d'appréhender des mécanismes contribuant au partage de connaissances, et à la construction devisions partagées en faveur d'une gestion durable des ressources. Ces mécanismes ont aussi un rôle important dans la "coévolution" des connaissances avec les systèmes socio-écologiques (Altieri 1986) permettant aux paysan.ne.s de s'adapter aux changements. Ces travaux ont aussi permis de mieux comprendre les pratiques agroforestières, en particulier celles concernant l'organisation de l'agrobiodiversité dans les *tsabo* et dans le paysage, en fonction des interactions entre espèces, et entre les espèces et le milieu.

***

Dans le contexte actuel de changements globaux, une part grandissante de la recherche sur les interactions entre les sociétés humaines et les écosystèmes reconnaît l'importance d'intégrer les connaissances locales (théoriques et empiriques) pour concevoir des trajectoires durables et résilientes de ces systèmes socio-écologiques (Altieri 2004, Folke 2004, Jacobi et al. 2017). Par exemple, dans la perspective d'une restauration de paysages agricoles dégradés, cela implique d'une part d'articuler les objectifs de restauration écologique avec ceux de développement agricole (Garcia et al. 2010, Montagnini et Metzel 2017), d'autre part, d'identifier dans les modes de gestion de l'agrobiodiversité les pratiques et les connaissances paysannes en adéquation avec les spécificités locales, qui contribuent à la restauration écologique et qui renforcent la résilience des populations rurales (Parrotta 2002, Lamb et al. 2005, Sayer et al. 2013). Dans le cas de paysages tropicaux forestiers, les pratiques agroforestières sont aujourd'hui largement préconisées pour concilier les enjeux écologiques avec ceux liés au développement local et pour faire face aux changements (Erdmann 2005, Mbow et al. 2014b, Hillbrand et al. 2017, Miller et al. 2020). À partir des résultats de ma recherche, le dernier chapitre de ce manuscrit offre des pistes de réflexion et d'action pour mettre en place une restauration intégrée des paysages reposant sur les pratiques agroforestières locales.

# Chapitre 9 |PERSPECTIVES POUR UNE RESTAURATION INTEGREE DES PAYSAGES VIA L'AGROFORESTERIE

Mon travail de recherche a permis d'identifier des pratiques et des connaissances à partir desquelles construire des actions de restauration selon l'idée que *"there is no one-fits-all solution for agroforestry systems*" ("il n'y a pas une seule manière de pratiquer l'agroforesterie", Jacobi et al. 2017). Dans cette perspective, le concept "d'approche intégrée des paysages" (*integrated landscape approach*, Boedhihartono et Sayer 2012) vise à concilier les objectifs de restauration avec les objectifs de développement agricole en intégrant les modes locaux de gestion de l'agrobiodiversité (Mansourian et al. 2020). Cependant, des études complémentaires sont nécessaires pour avoir une meilleure représentativité de la diversité des pratiques agroforestières dans la zone de Vavatenina et aussi pour mieux comprendre certaines dimensions des interactions agrobiodiversité-milieu, en particulier celles impliquant la ressource en eau et en lumière. De plus, l'application d'une approche intégrée implique de considérer les différents acteurs et leurs points de vue sur la diversification, car ces points de vue peuvent être des moteurs ou des freins aux dynamiques agroforestières. Ce dernier chapitre propose donc des pistes de réflexion et des méthodes pour approfondir les connaissances et les pratiques locales. Enfin, il présente un outil, développé au cours de ma thèse, facilitant le partage de connaissances et de points de vue entre acteurs, et qui pourrait permettre l'application d'une approche intégrée pour la restauration des paysages dégradés de la zone de Vavatenina.

## ♦Dimensions des connaissances et des pratiques à approfondir pour une gestion durable des ressources

Mon étude des connaissances paysan.ne.s a permis de mettre en évidence que l'eau et la lumière étaient aussi des facteurs du milieu déterminants dans les pratiques paysannes d'organisation de l'agrobiodiversité (en particulier dans les associations). En effet, plusieurs paysan.ne.s décrivent que certaines espèces ont des "racines dures" (*matoy vahatra*) (par exemple l'eucalyptus, les bambous, le litchi, le cannelier) car elles absorbent beaucoup l'eau du sol, elles se propagent vite et empêchent les autres cultures de pousser correctement. Iels décrivent aussi les espèces qui fournissent un ombrage trop important ou trop dense pour le giroflier ou, au contraire, celles dont le feuillage et la hauteur de canopée conviennent à la croissance du giroflier ou à celle du vanillier. L'eau et la lumière déterminent donc si une espèce est plutôt "négative" ou "positive" pour le giroflier et le vanillier par exemple (Figure 5-7, Appendix 9). Ainsi, les espèces qui composent l'agrobiodiversité locale peuvent aussi se caractériser par leurs interactions avec la lumière et l'eau, et par les effets "positifs" ou "négatifs" de ces interactions sur l'écologie de la parcelle et les cultures (Carrière 2003). Décrire ces connaissances permettrait de mieux considérer les différentes composantes physiques du milieu (par exemple en tenant compte de la stratification des différentes espèces) et de mieux répondre aux enjeux de l'adaptation de la restauration au contexte locale et aux changements (en particulier le changement climatique).

Par ailleurs, mes travaux relatent des connaissances paysannes sur les sols et offrent des exemples de pratiques pouvant contribuer à une gestion durable des sols et à la régénération de la fertilité. Cependant, la classification locale des sols gagnerait en précision si elle était confortée et précisée par des enquêtes menées dans d'autres villages de la zone de Vavatenina. Généraliser les connaissances documentées à Vohibary à toute la zone de Vavatenina permettrait par exemple de produire un support d'échange (par exemple une carte ethnopédologique) et de partage de connaissances pour l'élaboration, avec les acteurs locaux, de recommandations sur la valorisation des sols tenant compte de la diversité des perceptions et hybridant les connaissances scientifiques avec les connaissances paysannes (Barrios et Trejo 2003, Krasilnikov et Tabor 2003). Dans ce travail, plusieurs pratiques ont également été mises en évidence pour faire face à la baisse de la fertilité, à l'érosion et à leurs conséquences sur le développement des adventices. D'autres pratiques ont été observées mais n'ont pas pu être documentées précisément. Ces dernières concernent notamment l'usage des cendres, déjà décrit dans la littérature (Coomes et Burt 2001, Miltner et Coomes 2015, Coomes et Miltner 2017), celui des feuilles de girofliers distillées pour amender les jardins de brèdes en matière organique, ou encore le recouvrement du sol par des résidus végétaux secs (Figure 9-1).

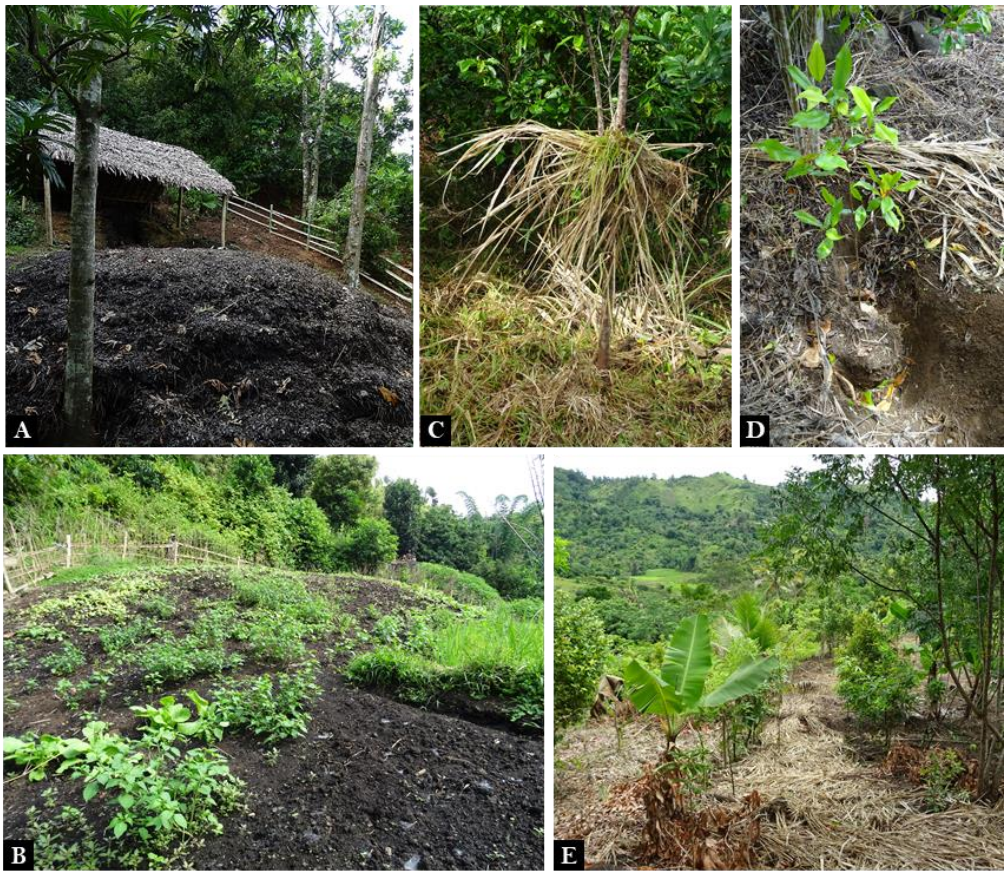



*Figure 9-1: (A) Tas de feuilles de giroflier distillées en train de se décomposer devant l'alambic. (B) Jardin de brèdes dans lequel les paysan.ne.s ont utilisé les feuilles de giroflier compostées pour amender le sol. (C) Technique de mise en suspension d'une adventice (*Imperata cylindrica*) pour éviter qu'elle repousse après avoir été arrachée. (D) Trou creusé autour d'un jeune plant de giroflier en vue de le remplir de matière organique (*zezika *par exemple) pour "booster" la croissance de l'arbre. (E) Recouvrement du sol avec des végétaux secs (©J.Mariel).*

### ♦Documenter les trajectoires des *tsabo* pour concevoir différentes modalités de restauration

Un des enjeux pour une restauration durable réside dans l'adaptabilité des actions au contexte local et aux changements (Mansourian et al. 2020). Une action qui viserait à promouvoir un "modèle" de *tsabo*, construit à partir des connaissances locales, doit contenir les modalités permettant de mener à bien cette action à partir de conditions initiales différentes. La littérature montre qu'il existe une diversité de trajectoires de diversification (Aumeeruddy et Sansonnens 1994, Jean-Denis et al. 2014, Jagoret et al. 2018) qui constitue des modalités d'adaptation de la restauration en exposant aux acteurs du terrain différentes propositions de pratiques pour différents résultats d'agroforêts. Ainsi, comprendre pourquoi les paysan.ne.s ont planté ou enlevé telle espèce et à tel moment dans la trajectoire de leur *tsabo*, permet de mettre évidence à la fois la diversité des trajectoires à l'origine d'agroforêts, mais aussi les moteurs et les freins à la diversification dans la conduite des agroforêts (Andriatsitohaina et al. 2020, Andriamihaja 2021, Shennan-Farpón et al. 2022). D'autres aspects peuvent aussi être mis en avant : les espèces que les paysan.ne.s renouvellent continuellement, les arbres qui sont coupés en cas de besoin en bois ou ceux qui sont toujours conservés, voire protégés, ou encore les pratiques réalisées dans le *tsabo* suite à un aléas (économique, cyclonique par exemple).

### ♦Prendre en compte les valeurs associées à l'agrobiodiversité et au paysage

Les enquêtes individuelles conduites auprès des paysan.ne.s de Vohibary ont permis d'appréhender de manière exploratoire la notion de préférences ou de valeurs associées à l'agrobiodiversité, qui sont des aspects pouvant se traduire dans la composition du cortège d'espèces gérées dans leur *tsabo* (Jagoret et al. 2014, Angé et al. 2018, Allen et al. 2018). Par exemple, en posant successivement les questions *"si toutes les plantes de votre tsabo étaient enlevées, quelles sont les trois que vous garderiez ? "* puis, après la réponse, *"si vous pouviez planter seulement deux espèces en plus avec les trois gardées, quelles seraient-elles ?"*, 77 % des personnes interrogées (N=108 , *NA*=4) ont répondu le giroflier pour la 1ière espèce gardée (et 11% la vanille) mais aucune réponse majoritaire n'est ressorti pour la 2ième espèce gardée (par exemple 22% ont répondu le vanillier et 20 % le litchi). Concernant la deuxième question (les deux espèces ajoutées), il n'y a pas eu de réponses majoritaires et les espèces données par les paysan.ne.s étaient très diverses (27 espèces au total) : des cultures commerciales, des arbres fruitiers, des arbres à bois, des tubercules ou des brèdes par exemple. Si ces observations permettent de voir que le giroflier est la culture qui semble être la plus importante pour les paysan.ne.s de Vohibary, elles montrent aussi que chaque paysan.ne a ses préférences concernant les autres espèces à associer au giroflier. Cette notion de préférence ou de valeur est importance à considérer pour concevoir une restauration qui puisse convenir aux mieux à chaque paysan.ne mais aussi au collectif. Un moyen de recueillir ces préférences associées à l'agrobiodiversité serait de conduire des enquêtes individuelles en mobilisant la méthode du *free-listing* (Albuquerque et al. 2014). Cette méthode, qui repose sur le principe d'une énumération, permet de mesurer la saillance culturelle relative aux éléments énumérés par la personne interrogée, c'est-à-dire leur relative importance (Quinlan 2005).

Dans un objectif de restauration via l'agroforesterie, le *free-listing* peut aider à l'identification des espèces qui composeraient l'agrobiodiversité des *tsabo*, en questionnant par exemple sur les préférences concernant les différentes contribution des espèces (Díaz et al. 2018) et sur leur adéquation respective au contexte local (environnemental, socioéconomique).

*"J'aimerai que mon* tsabo *devienne une forêt" V.*

*"Dasn un beau* tsabo, *les feuilles sont vert foncé et le bois est solide" R.*

Les paysages agricoles sont fréquemment qualifiés de "bioculturels" (Johnson et Hunn 2010) car les pratiques paysannes qui les façonnent représentent des traits qui participent à dessiner l'identité culturelle d'une société rurale (Hong 2014, Agnoletti et Rotherham 2015, Carrière et al. 2022, sous-presse). Mobiliser une approche "bioculturelle" permettrait de mieux intégrer des perceptions locales et de s'en inspirer pour concevoir la restauration des paysages (Sterling et al. 2017, Hanspach et al. 2020). En effet, les approches bioculturelles "*considèrent les interactions dynamiques entre les connaissances, les pratiques et les ontologies locales, et reconnaissent les interrelations créatrices entre les personnes et leur environnement, ainsi que les processus et les rétroactions qui soutiennent le bien-être écologique et humain*" (Caillon et al. 2017)". Ce type d'approche est aussi plus adapté pour recueillir les valeurs esthétiques et les représentations que les paysan.ne.s projettent dans les paysages (Pichon 2015). Cette dimension sensible et symbolique associée à la relation des paysan.ne.s avec leur environnement intervient dans les pratiques d'usage des terres (Carrière 2003, Carrière et al. 2005). À Vohibary, diverses discussions avec des paysan.ne.s ont permis de percevoir la nostalgie de l'époque où les forêts étaient encore présentes dans leur environnement, et ainsi d'appréhender différemment leurs motivations à cultiver et à maintenir une riche agrobiodiversité. Ainsi, diversifier les *tsabo* est une manière de faire naître une "nouvelle forêt", c'est "*cultiver la diversité, comme la forêt [le fait]*" B.S. Cette analogie entre la forêt et les *tsabo* s'exprime aussi dans le vocabulaire que les paysan.ne.s emploient pour parler de leurs *tsabo*. Par exemple, quand iels s'apprêtent à quitter le village pour aller travailler dans leur *tsabo*, iels ne disent pas "je vais dans mon *tsabo*" (*ande any tsabo*) mais "je vais dans la forêt" (*ande an'atiala*), ou quand iels décrivent ce qu'est un "beau *tsabo*" (*tsabo tsara*) certaines personnes font référence à des caractéristiques visuelles qui rappellent la forêt luxuriante (cf. citations ci-dessus).

Outre ces représentations associées à la diversification, les espaces vécus par les paysan.ne.s sont aussi associés à des représentations symboliques qui peuvent influencer l'intégration de l'agroforesterie dans les paysages. Lors d'un *focus* groupe, les paysan.ne.s ont dessiné la carte du territoire de Vohibary (Figure 9-2) et mentionné la toponymie des différents espaces. Cette dernière est riche de significations. Certains noms renvoient à l'histoire coloniale, comme par exemple *trano vato* (maison de pierre) qui fait référence à la grotte dans laquelle les familles se réfugiaient lors de l'insurrection. D'autres noms décrivent les conditions agroécologiques et climatiques des *tanety*, par exemple *be rivotra* (beaucoup de vent) signifie que la *tanety* est très exposée aux cyclones ou *mahizigny atoandro* (sombre journée) traduit le fait que l'endroit reçoit moins de lumière au cours de la journée.

Ces aspects sont donc importants à considérer dans la manière de réfléchir à l'intégration des pratiques agroforestières dans les paysages.

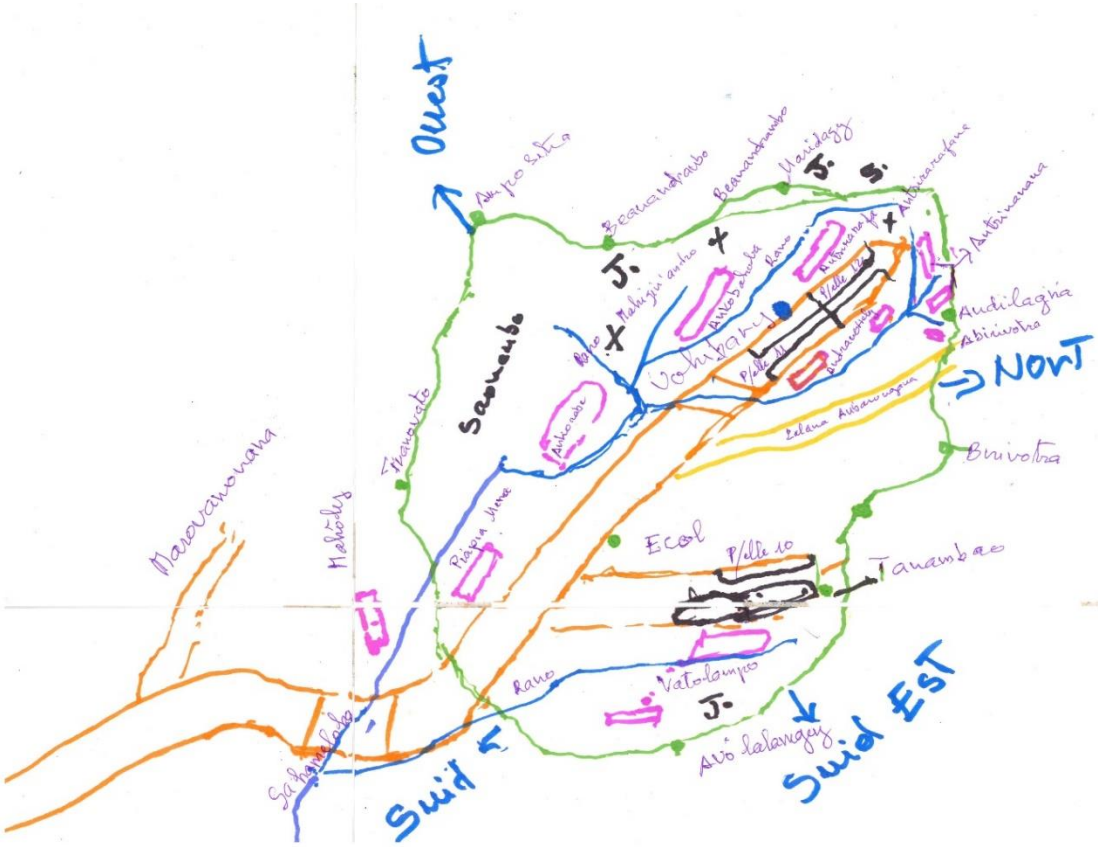



*Figure 9-2: Carte du territoire de Vohibary dessinée par plusieurs paysans lors d'un focus groupe.*

### ♦Recueillir la diversité des points de vue sur la diversification

L'application d'une approche intégrée dans une perspective de restauration via l'agroforesterie soulève de nombreux enjeux et, en particulier, la compréhension des points de vue des différents acteurs du paysage concernant la diversification, ses avantages et ses contraintes (Sayer et al. 2013, Mansourian et al. 2020). En effet, chaque acteur (paysan.ne, acteurs économiques, politiques, gestionnaires, académiques par exemple) conçoit son rapport au paysage en fonction des usages, des valeurs et des croyances qu'il lui associe (Sayer et al. 2013). Par ailleurs, des acteurs défendant les mêmes objectifs ou partageant les mêmes valeurs et les mêmes croyances peuvent aussi avoir différentes manières de les exprimer et de les traduire en actions (Sayer et al. 2013). Par conséquent, leur point de vue respectif sur la diversification peut être différent. Dans le cadre de ma recherche, seuls les points de vue des paysan.ne.s ont pu être appréhendés de manière qualitative dans les enquêtes ou lors de discussions informelles.

Par exemple, des paysan.ne.s de Vohibary ont décrit que *"quand les espèces sont trop serrées, les fruits qu'elles produisent sont plus petits, comme c'est le cas pour le bananier, le giroflier et les ananas"* B. ou que

"*trop d'espèces mélangées et peu espace peuvent réduire la qualité des récoltes, par exemple quand les ananas poussent sous les girofliers ils sont acides*" M. Ce point de vue est aussi relaté par Lacerda et al. (2020) dont l'étude soulève l'enjeu de promouvoir des pratiques agroforestières pour la restauration de paysages dégradés quand le point de vue dominant est que la monoculture est la pratique qui fournit les meilleurs rendements et des produits de meilleure qualité. Outre ces aspects, d'autres paysan.ne.s ont exprimé leur crainte relative aux cyclones qui auraient des impacts plus forts dans les plantations diversifiées : "*si des gros arbres et des petits sont mélangés, les gros peuvent tuer les petits même s'il y a peu de vent*" B.R., "*certains arbres sont arrachés par le vent quand il y a des cyclones et cela détruit les autres cultures*" E. L'association de l'agroforesterie et de l'élevage semble aussi représenter un enjeu car, d'une part, la gestion de différentes cultures nécessitent beaucoup de temps de travail et l'élevage d'animaux aussi et, d'autre part, les animaux comme les zébus et les porcs peuvent causer des dégâts lorsqu'ils ne sont pas bien surveillés ("*avant il y avait moins d'animaux domestiques qui abîmaient les* tsabo, *maintenant je suis obligé de mettre des barrières*" M.). Ces citations de paysan.ne.s donnent des exemples de contraintes associées à la diversification qui peuvent constituer des freins à l'adoption de pratiques agroforestières et donc des obstacles à une restauration reposant sur cette pratique (Lacerda et al. 2020, Shennan-Farpón et al. 2022). Ces différents points de vue, non partagés de tous, suggèrent que certaines personnes ont peut-être mis en place des pratiques pour pallier des contraintes liées à la diversification ; des pratiques qui pourraient être échangées entre paysan.ne.s.

La diversification soulève aussi des enjeux économiques que les paysan.ne.s relatent, par exemple, en décrivant les difficultés à vendre certains produits en raison de l'absence de filières locales pour leur commercialisation, de voies de communication en bon état (par exemple les fruits autres que les litchis) ou en s'indignant des prix auxquels sont achetées leurs récoltes du fait de la présence de plusieurs intermédiaires qui ont la mainmise sur la filière des productions (clou de girofle, huile essentielle, vanille, litchi notamment). En tant que freins et leviers, les acteurs économiques ont donc une place cruciale dans les processus de diversification des productions agricoles et de leur valorisation. Ils doivent donc être pris en compte dans la perspective d'une restauration via l'agroforesterie.

Selon le contexte local, d'autres acteurs doivent être considérés afin d'évaluer dans quelles mesures ils peuvent représenter des barrières à la diversification ou proposer des mécanismes en sa faveur (acteurs institutionnels, structures de développement et d'appuis agricoles, associations locales, organisations non gouvernementales par exemple). Pour illustrer cela, Shennan-Farpón et al. (2022) soulignent dans leur étude qu'en raison d'un manque de soutien du gouvernement, les paysan.ne.s se sentiraient plus confiant.e.s à s'engager dans l'agroforesterie s'il y avait une implication plus forte à l'échelle de la communauté en favorisant, par exemple, le partage de connaissances entre les personnes pratiquant déjà l'agroforesterie et les autres.

En résumé, considérer la diversité des acteurs, recueillir et prendre en compte leurs points de vue sur la diversification sont deux aspects essentiels pour une restauration intégrée des paysages via l'agroforesterie. Ces deux points permettent de mettre en évidence, d'une part, des sources de tension

et de conflits entre acteurs qui doivent être identifiées et gérées (Emborg et al. 2012, Sayer et al. 2013, Waeber et al. 2019), d'autre part, les freins et les leviers de la diversification pour le développement de pratiques agroforestières (Coe et al. 2014, Shennan-Farpón et al. 2022).

### ♦Un jeu de rôle multi-acteurs pour rassembler, partager et co-construire des trajectoires résilientes de paysages agroforestiers

Considérer les différents acteurs et intégrer leurs points de vue dans une perspective de restauration présente des enjeux méthodologiques, de même que l'objectif de partager ces différents points de vue afin d'améliorer la compréhension mutuelle entre acteurs. A cette fin, la mobilisation d'outils participatifs de type "jeux sérieux" a montré sa pertinence pour aborder des enjeux de développement agricole et de résilience dans un contexte de paysages agroforestiers en région tropicale (Fauvelle et Garcia 2018, Kamto et al. 2019, Garcia et al. 2020, Andreotti et al. 2020, Resque et al. 2021).

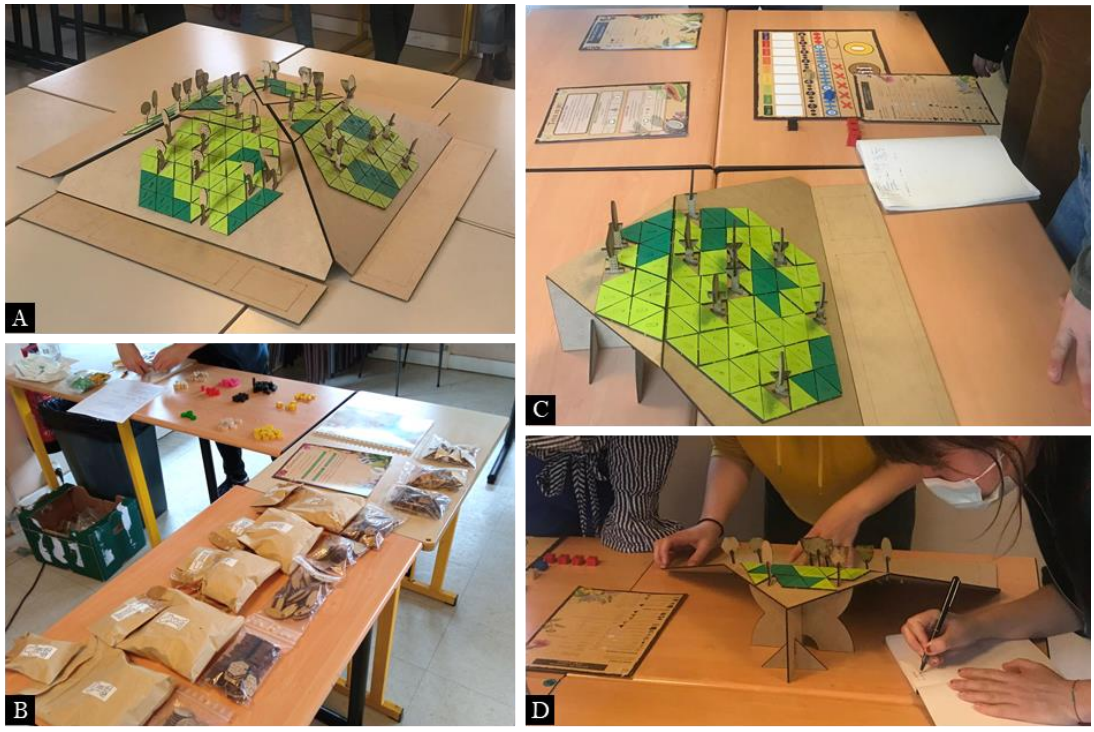
En effet, au cours d'un jeu sérieux de type "jeu de rôle", les sessions de jeu sont des mises en situation interactives qui permettent aux différent.e.s participant.e.s d'endosser le rôle d'un des acteurs du paysage et de s'emparer de leurs points de vue, de leurs manières d'appréhender la "siuation problématique". Cela permet ainsi de révéler les types de facteurs considérés dans la prise de décision individuelle (Dung et al. 2009, Michalscheck et al. 2020, Venot et al. 2022). Par ailleurs, les sessions de jeux créent un espace de dialogue entre les différents acteurs qui facilite le partage de connaissances et l'apprentissage collectif (Flood et al. 2018, Moreau et al. 2019). De plus, ce partage de connaissances peut conduire à différents objectifs : par exemple, il permet pour les gens d'échanger sur leurs pratiques agricoles et leurs stratégies d'adaptation aux changements, ou pour des acteurs du développement de définir des questions dont ils devraient se saisir pour mieux répondre aux attentes sociétales. Ainsi, un tel outil peut être utilisé dans le cadre d'ateliers prospectifs pour co-construire des modalités de restauration des paysages via l'agroforesterie qui soient adaptées au contexte local et qui renforcent la résilience des populations.

***

Grâce à une équipe interdisciplinaire de chercheur.e.s, d'étudiant.e.s et d'un développeur de jeu, nous avons tout au long de ma thèse travaillé à la construction d'un prototype de jeu (Figure 9-3, Appendix 11) dont l'objectif premier est le partage entre paysan.ne.s de connaissances sur les pratiques agroforestières et celui de stratégies d'adaptation aux aléas de différentes natures (variation des prix, cyclone par exemple). Le travail a débuté en 2020 dans le cadre du projet RADIPAM (Réseaux d'Acteurs et DIversification des Paysages Agroforestiers à Madagascar) financé par la Maison des Sciences de l'Homme SUD de Montpellier. En mobilisant une démarche de modélisation d'accompagnement (http://www.commod.org), une première étape a ainsi consisté à la construction d'un modèle conceptuel du système étudié selon la méthode PARDI (Problématique, Acteurs, Ressources, Dynamiques, Interactions ; Étienne 2010) ; c'est-à-dire un modèle qui représente la

diversité des interactions et des dynamiques dans un système socio-écologique tel que celui d'un paysage agricole. A partir de ce modèle, la deuxième étape a visé à définir le support de jeu et ses éléments (plateau, pions, cartes, table de jeu par exemple), ainsi que tout le processus de "gamification" (règles du jeu, déroulement d'une partie et d'un tour de jeu, Appendix 11). La troisième étape visera à tester le jeu à Madagascar dans l'objectif de son amélioration au regard des retours que les paysan.ne.s feront à l'issue des sessions de jeu. Enfin, dans la perspective de son usage pour co-construire des modalités de restauration des paysages qui soient adaptées localement, des extensions du jeu seront à définir afin d'aborder plus spécifiquement les enjeux liés à la restauration et d'inclure d'autres acteurs impliqués dans les dynamiques des paysage (acteurs économiques, gestionnaires des territoires), au-delà des paysan.ne.s jusque-là ciblé.e.s en priorité.

*Figure 9-3: Photographies prises par E. Stephan et R. Figueroa Brollo lors de la 1ère session de test du prototype de jeu AgroTsabo avec les étudiants de l'IDES (Appendix 11). (A) Plateau du jeu dans son intégralité. (B) Portion individuelle du plateau de jeu correspondant à un* tsabo*, et sur laquelle les joueurs d'une même équipe réalisent des actions dans leur* tsabo*. (B) Les différents éléments du jeu. (D) Des joueurs en train de manipuler leur* tsabo*.*

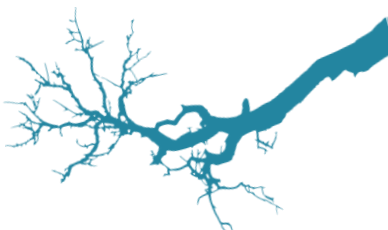




# *Efa vita*

*Efa vita* (c'est déjà fini). C'est avec ces mots que je terminais mes enquêtes qui duraient souvent plusieurs heures, surtout quand on partait visiter les *tsabo* (il fallait plutôt compter une demi-journée). Ces mots invoquent des souvenirs de visages souriants, satisfaits d'avoir répondu à toutes les questions de la *vazaha*, heureux d'avoir partagés leurs connaissances, et aussi soulagés que l'enquête se termine…Si ma thèse se termine là, les expériences de vie avec les gens de Vavatenina et leurs *tsabo* vont continuer, sous d'autres formes, et promettent des aventures *tsara be*.





# Littérature

## ♦Références citées


Abebe, T., F. J. Sterck, K. F. Wiersum, and F. Bongers. 2013. Diversity, Composition and Density of Trees and Shrubs in Agroforestry Homegardens in Southern Ethiopia. *Agroforestry Systems* 87:1283–1293. doi: 10.1007/s10457-013-9637-6.

Abebe, T., K. F. Wiersum, and F. Bongers. 2010. Spatial and Temporal Variation in Crop Diversity in Agroforestry Homegardens of Southern Ethiopia. *Agroforestry Systems* 78:309–322. doi: 10.1007/s10457-009-9246-6.

Abizaid, C., O. T. Coomes, and M. Perrault-Archambault. 2016. Seed Sharing in Amazonian Indigenous Rain Forest Communities: A Social Network Analysis in Three Achuar Villages, Peru. *Human Ecology* 44:577–594. doi: 10.1007/s10745-016-9852-7.

Abric, J.-C. 2011. *Pratiques Sociales et Représentations*. Presses Universitaires de France, Paris, France.

Acharya, A. K., and N. Kafle. 2009. Land Degradation Issues in Nepal and Its Management Through Agroforestry. *Journal of Agriculture and Environment* 10:133–143. doi: 10.3126/aej.v10i0.2138.

Adger, W. N., P. M. Kelly, A. Winkels, L. Q. Huy, and C. Locke. 2002. Migration, Remittances, Livelihood Trajectories, and Social Resilience. *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 31:358–366. doi: 10.1579/0044-7447-31.4.358.

Adhikari, K., and A. E. Hartemink. 2016. Linking Soils to Ecosystem Services — A Global Review. *Geoderma* 262:101–111. doi: 10.1016/j.geoderma.2015.08.009.

Agnoletti, M., and I. D. Rotherham. 2015. Landscape and Biocultural Diversity. *Biodiversity and Conservation* 24:3155–3165. doi: 10.1007/s10531-015-1003-8.

Albrecht, A., and S. T. Kandji. 2003. Carbon Sequestration in Tropical Agroforestry Systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 99:15–27. doi: 10.1016/S0167-8809(03)00138-5.

Albuquerque, U. P., L. V. F. Cruz da Cunha, R. F. P. de Lucena, and R. R. N. Alves (Eds.). 2014. *Methods and Techniques in Ethnobiology and Ethnoecology*. Springer New York, New York, NY. doi: 10.1007/978-1-4614-8636-7.

Allen, K. E., C. E. Quinn, C. English, and J. E. Quinn. 2018. Relational Values in Agroecosystem Governance. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 35:108–115. doi: 10.1016/j.cosust.2018.10.026.

Almekinders, C. J. M., and N. P. Louwaars. 2002. The Importance of the Farmers' Seed Systems in a Functional National Seed Sector. *Journal of New Seeds* 4:15–33. doi: 10.1300/J153v04n01_02.

Altendorf, S. 2018. *Minor Tropical Fruits*. pp. 65–75. FAO, Rome, Italy.

Altieri, M. A. 1986. *L'Agroécologie: Bases Scientifiques d'une Agriculture Alternative*, Charles Corlet. Charles Corlet Editions, Condé-sur-Noireau, France.

Altieri, M. A. 1989. Agroecology: A New Research and Development Paradigm for World Agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 27:37–46. doi: 10.1016/0167-8809(89)90070-4.

Altieri, M. A. 2002. Agroecology: The Science of Natural Resource Management for Poor Farmers in Marginal Environments. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 93:1–24. doi: 10.1016/S0167-8809(02)00085-3.

Altieri, M. A. 2004. Linking Ecologists and Traditional Farmers in the Search for Sustainable Agriculture. *Frontiers in Ecology and the Environment* 2:35–42. doi: 10.1890/1540-9295(2004)002[0035:LEATFI]2.0.CO;2.

Altieri, M. A., and C. I. Nicholls. 2017. The Adaptation and Mitigation Potential of Traditional Agriculture in a Changing Climate. *Climatic Change* 140:33–45.

Amazonas, N. T., D. I. Forrester, R. S. Oliveira, and P. H. S. Brancalion. 2018. Combining Eucalyptus Wood Production with the Recovery of Native Tree Diversity in Mixed Plantings: Implications for Water Use and Availability. *Forest Ecology and Management* 418:34–40. doi: 10.1016/j.foreco.2017.12.006.

Anderman, T. L., R. Remans, S. A. Wood, K. DeRosa, and R. S. DeFries. 2014. Synergies and Tradeoffs between Cash Crop Production and Food Security: A Case Study in Rural Ghana. *Food Security* 6:541–554. doi: 10.1007/s12571-014-0360-6.

Anders, R., and W. H. Batchelder. 2015. Cultural Consensus Theory for the Ordinal Data Case. *Psychometrika* 80:151–181. doi: 10.1007/s11336-013-9382-9.

Anderson, E. N., D. Pearsall, E. Hunn, and N. Turner. 2012. *Ethnobiology*. John Wiley & Sons.

Andreotti, F., E. N. Speelman, K. Van den Meersche, and C. Allinne. 2020. Combining Participatory Games and Backcasting to Support Collective Scenario Evaluation: An Action Research Approach for Sustainable Agroforestry Landscape Management. *Sustainability Science* 15:1383–1399. doi: 10.1007/s11625-020-00829-3.

Andres, C., H. Comoé, A. Beerli, M. Schneider, S. Rist, and J. Jacobi. 2016. Cocoa in Monoculture and Dynamic Agroforestry. In *Sustainable Agriculture Reviews: Volume 19*, edited by E. Lichtfouse, pp. 121–153. Springer International Publishing, Cham. doi: 10.1007/978-3-319-26777-7_3.

Andriamihaja, O. R. 2021. Identifying Agents of Change for Sustainable Land Governance. *Land Use Policy*:12.

Andriatsitohaina, R. N. N., E. Celio, J. C. Llopis, Z. H. Rabemananjara, B. S. Ramamonjisoa, and A. Grêt-Regamey. 2020. Participatory Bayesian Network Modeling to Understand Driving Factors of Land-Use Change Decisions: Insights from Two Case Studies in Northeast Madagascar. *Journal of Land Use Science* 15:69–90. doi: 10.1080/1747423X.2020.1742810.

Angé, O., A. Chipa, P. Condori, A. C. Ccoyo, L. Mamani, R. Pacco, N. Quispe, W. Quispe, and M. Sutta. 2018. Interspecies Respect and Potato Conservation in the Peruvian Cradle of Domestication. *Conservation and Society* 16:30–40.

Anglaaere, L. C. N., J. Cobbina, F. L. Sinclair, and M. A. McDonald. 2011. The Effect of Land Use Systems on Tree Diversity: Farmer Preference and Species Composition of Cocoa-Based Agroecosystems in Ghana. *Agroforestry Systems* 81:249–265. doi: 10.1007/s10457-010-9366-z.

Ango, T. G., L. Börjeson, F. Senbeta, and K. Hylander. 2014. Balancing Ecosystem Services and Disservices: Smallholder Farmers' Use and Management of Forest and Trees in an Agricultural Landscape in Southwestern Ethiopia. *Ecology and Society* 19.

Arimalala, N., E. Penot, T. Michels, V. Rakotoarimanana, I. Michel, H. Ravaomanalina, E. Roger, M. Jahiel, J.-M. Leong Pock Tsy, and P. Danthu. 2019. Clove Based Cropping Systems on the East Coast

of Madagascar: How History Leaves Its Mark on the Landscape. *Agroforestry Systems* 93:1577–1592. doi: 10.1007/s10457-018-0268-9.

Atangana, A., D. Khasa, S. Chang, and A. Degrande. 2014. Agroforestry for Soil Conservation. In *Tropical Agroforestry*, edited by A. Atangana, D. Khasa, S. Chang, and A. Degrande, pp. 203–216. Springer Netherlands, Dordrecht. doi: 10.1007/978-94-007-7723-1_9.

Atran, S. 1991. L'ethnoscience Aujourd'hui. *Social Science Information* 30:595–662. doi: 10.1177/053901891030004001.

Atran, S., and D. Medin. 2008. *The Native Mind and the Cultural Construction of Nature*, Kim Sterelny and Robert A. Wilson. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.

Aubert, S., S. Razafiarison, and A. Bertrand. 2003. *Déforestation et systèmes agraires à Madagascar: les dynamiques des tavy sur la côte orientale*. Editions Quae.

Aumeeruddy, Y., and B. Sansonnens. 1994. Shifting from Simple to Complex Agroforestry Systems: An Example for Buffer Zone Management from Kerinci (Sumatra, Indonesia). *Agroforestry Systems* 28:113–141. doi: 10.1007/BF00704825.

Badstue, L. B., M. R. Bellon, X. Juárez, I. Manuel, and A. M. Solano. 2002. Social Relations and Seed Transactions: Small-Scale Farmers Access to Maize Landraces in the Central Valleys of Oaxaca: Preliminary Findings. *Economics Working Paper*:20–20.

Baggio, J. A., and V. Hillis. 2018. Managing Ecological Disturbances: Learning and the Structure of Social-Ecological Networks. *Environmental Modelling & Software* 109:32–40. doi: 10.1016/j.envsoft.2018.08.002.

Bailey, I., and L. E. Buck. 2016. Managing for Resilience: A Landscape Framework for Food and Livelihood Security and Ecosystem Services. *Food Security* 8:477–490. doi: 10.1007/s12571-016-0575-9.

Bannister, M. E., and P. K. R. Nair. 2003. Agroforestry Adoption in Haiti: The Importance of Household and Farm Characteristics. *Agroforestry Systems* 57:149–157. doi: 10.1023/A:1023973623247.

Barbier, J.-M. 2018. Savoirs, Connaissances, Capacités, Compétences : Une Question Sociale et Politique ? http://theconversation.com/savoirs-connaissances-capacites-competences-une-question-sociale-et-politique-91639. Accessed February 7, 2022.

Barral, M. P., J. M. Rey Benayas, P. Meli, and N. O. Maceira. 2015. Quantifying the Impacts of Ecological Restoration on Biodiversity and Ecosystem Services in Agroecosystems: A Global Meta-Analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 202:223–231. doi: 10.1016/j.agee.2015.01.009.

Barral, S., and F. Ruf. 2012. Industrial or family plantations? Different perspectives on the production of palm oil and cocoa in Indonesia and Ghana. *Autrepart* 62:75–93.

Barrera-Bassols, N., J. Alfred Zinck, and E. Van Ranst. 2006. Symbolism, Knowledge and Management of Soil and Land Resources in Indigenous Communities: Ethnopedology at Global, Regional and Local Scales. *CATENA* 65:118–137. doi: 10.1016/j.catena.2005.11.001.

Barrios, E., and M. T. Trejo. 2003. Implications of Local Soil Knowledge for Integrated Soil Management in Latin America. *Geoderma* 111:217–231. doi: 10.1016/S0016-7061(02)00265-3.

Barrios, E., V. Valencia, M. Jonsson, A. Brauman, K. Hairiah, P. E. Mortimer, and S. Okubo. 2018. Contribution of Trees to the Conservation of Biodiversity and Ecosystem Services in Agricultural Landscapes. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management* 14:1–16. doi: 10.1080/21513732.2017.1399167.

Bart, F. 2007. Café des montagnes, café des plaines. *Études rurales*:35–48. doi: 10.4000/etudesrurales.8505.

Bazile, D., S. Dembélé, M. Soumaré, and D. Dembélé. 2008. Utilisation de la diversité variétale du sorgho pour valoriser la diversité des sols au Mali. *Cahiers Agricultures* 17:86-94 (1). doi: 10.1684/agr.2008.0172.

Bellon, M. R. 1991. The Ethnoecology of Maize Variety Management: A Case Study from Mexico. *Human Ecology* 19:389–418. doi: 10.1007/BF00888984.

Bellow, J. G., R. F. Hudson, and P. K. R. Nair. 2008. Adoption Potential of Fruit-Tree-Based Agroforestry on Small Farms in the Subtropical Highlands. *Agroforestry Systems* 73:23–36. doi: 10.1007/s10457-008-9105-x.

Bene, J. G., H. W. Beall, and A. Côté. 1977. *Trees, Food, and People: Land Management in the Tropics*. International Development Research Centre, [Ottawa.

Berkes, F., and M. K. Berkes. 2009. Ecological Complexity, Fuzzy Logic, and Holism in Indigenous Knowledge. *Futures* 41:6–12. doi: 10.1016/j.futures.2008.07.003.

Berkes, F., J. Colding, and C. Folke. 2000. Rediscovery of Traditional Ecological Knowledge as Adaptative Management. *Ecological Applications* 10:1251–1262. doi: 10.1890/1051-0761(2000)010[1251:ROTEKA]2.0.CO;2.

Berkes, F., and T. Henley. 1997. Co-Management and Traditional Knowledge: Threat or Opportunity? *Policy Options* 18:29–30.

Berkes, F., and P. J. Usher. 2000. Sacred Knowledge, Traditional Ecological Knowledge & Resource Management. *Arctic* 53:198.

Berlin, B., and P. F. Stevens. 1994. Ethnobiological Classification: Principles of Categorization of Plants and Animals in Traditional Societies. *Systematic Biology* 43:293–295.

Bhagwat, S. A., K. J. Willis, H. J. B. Birks, and R. J. Whittaker. 2008. Agroforestry: A Refuge for Tropical Biodiversity? *Trends in Ecology & Evolution* 23:261–267. doi: 10.1016/j.tree.2008.01.005.

Bing, J.-B. 2018. Dynamique des savoirs et co-construction des sylvosystèmes en pays javanais et betsimisaraka. doi: 10.13097/ARCHIVE-OUVERTE/UNIGE:103460.

Black, R., S. R. G. Bennett, S. M. Thomas, and J. R. Beddington. 2011. Migration as Adaptation. *Nature* 478:447–449. doi: 10.1038/478477a.

Blanco, J., and S. M. Carrière. 2016. Sharing Local Ecological Knowledge as a Human Adaptation Strategy to Arid Environments: Evidence from an Ethnobotany Survey in Morocco. *Journal of Arid Environments* 127:30–43. doi: 10.1016/j.jaridenv.2015.10.021.

Blanc-Pamard, C. 1986. Dialoguer avec le paysage ou comment l'espace écologique est vu et pratiqué par les communautés rurales des hautes terres malgaches. In *Milieux et paysages : essai sur diverses modalités de connaissance*, edited by Y. Chatelin and G. Riou, pp. 17–36. Masson, Paris.

Blanc-Pamard, C., and H. Rakoto Ramiarantsoa. 2000. *Le terroir et son double: Tsarahonenana 1966-1992 (Madagascar)*. IRD Éditions. doi: 10.4000/books.irdeditions.10279.

Blanc-Pamard, C., and F. Ruf. 1992. *La transition caféière: Côte est de Madagascar*. Editions Quae.

Blaschke, T. 2010. Object Based Image Analysis for Remote Sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65:2–16. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2009.06.004.

Bodin, Ö., B. Crona, and H. Ernstson. 2006. Social Networks in Natural Resource Management: What Is There to Learn from a Structural Perspective? *Ecology and Society* 11.

Bodin, Ö., and B. I. Crona. 2009. The Role of Social Networks in Natural Resource Governance: What Relational Patterns Make a Difference? *Global Environmental Change* 19:366–374. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2009.05.002.

Bodin, Ö., and M. Tengö. 2012. Disentangling Intangible Social–Ecological Systems. *Global Environmental Change* 22:430–439. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2012.01.005.

Boedhihartono, A. K., and J. Sayer. 2012. Forest Landscape Restoration: Restoring What and for Whom? In *Forest Landscape Restoration: Integrating Natural and Social Sciences*, edited by J. Stanturf, D. Lamb, and P. Madsen, pp. 309–323. Springer Netherlands, Dordrecht. doi: 10.1007/978-94-007-5326-6_16.

Borcard, D., F. Gillet, and P. Legendre. 2011. *Numerical Ecology with R*. Springer-Verlag, New York. doi: 10.1007/978-1-4419-7976-6.

Borden, R. W., I. C. Baillie, and S. H. Hallett. 2020. The East African Contribution to the Formalisation of the Soil Catena Concept. *CATENA* 185:104291. doi: 10.1016/j.catena.2019.104291.

Borgatti, S. P. 1998. Elicitation Techniques for Cultural Domain Analysis. In *The Ethnographer's Toolkit*, edited by J. J. Schensul and M. D. LeCompte, pp. 1–26. Altimira Press, Walnut Creek, California, US.

Bos, M. M., I. Steffan-Dewenter, and T. Tscharntke. 2007. The Contribution of Cacao Agroforests to the Conservation of Lower Canopy Ant and Beetle Diversity in Indonesia. *Biodiversity and Conservation* 16:2429–2444. doi: 10.1007/s10531-007-9196-0.

Boster, J. S. 1985. Selection for Perceptual Distinctiveness: Evidence from Aguaruna Cultivars of Manihot Esculenta. *Economic Botany* 39:310–325.

Boster, J. S., J. C. Johnson, and S. C. Weller. 1987. Social Position and Shared Knowledge: Actors' Perceptions of Status, Role, and Social Structure. *Social Networks* 9:375–387. doi: 10.1016/0378-8733(87)90005-0.

Bousssard, H., and J. Baudry. 2017. *Chloe4.0: A Software for Landscape Pattern Analysis.*

Brand, J., and J. L. Pfund. 1998. Site-and Watershed-Level Assessment of Nutrient Dynamics under Shifting Cultivation in Eastern Madagascar. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 71:169–183. doi: 10.1016/S0167-8809(98)00139-X.

Brickell, K., and A. Datta. 2011. *Translocal Geographies.* Ashgate Publishing, Ltd.

Brinkmann, K., L. Samuel, S. Peth, and A. Buerkert. 2018. Ethnopedological Knowledge and Soil Classification in SW Madagascar. *Geoderma Regional* 14:e00179. doi: 10.1016/j.geodrs.2018.e00179.

Brito, C. de C. de, T. C. da Silva, U. P. Albuquerque, M. A. Ramos, W. S. Ferreira, F. N. Barros, E. M. Costa, and P. M. de Medeiros. 2017. The Use of Different Indicators for Interpreting the Local Knowledge Loss on Medical Plants. *Revista Brasileira de Farmacognosia* 27:245–250.

Brüning, L. Z., M. Krieger, E. Meneses-Pelayo, N. Eisenhauer, M. P. Ramirez Pinilla, B. Reu, and R. Ernst. 2018. Land-Use Heterogeneity by Small-Scale Agriculture Promotes Amphibian Diversity in Montane Agroforestry Systems of Northeast Colombia. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 264:15–23. doi: 10.1016/j.agee.2018.05.011.

Burel, F., and J. Baudry. 2005. Habitat Quality and Connectivity in Agricultural Landscapes: The Role of Land Use Systems at Various Scales in Time. *Ecological Indicators* 5:305–313. doi: 10.1016/j.ecolind.2005.04.002.

Burnod, P., H. Rakotomalala, B. S. Andriamanalina, and H. Di Roberto. 2016. Composer entre la famille et le marché à Madagascar: Évolution de l'accès des jeunes agriculteurs à la terre. *Afrique contemporaine* 259:23. doi: 10.3917/afco.259.0023.

Buttoud, G. 2013. *Advancing Agroforestry on the Policy Agenda: A Guide for Decision-Makers*. FAO, Rome.

Byg, A., and H. Balslev. 2001. Diversity and Use of Palms in Zahamena, Eastern Madagascar. *Biodiversity & Conservation* 10:951–970. doi: 10.1023/A:1016640713643.

Cadger, K., A. Quaicoo, E. Dawoe, and M. Isaac. 2016. Development Interventions and Agriculture Adaptation: A Social Network Analysis of Farmer Knowledge Transfer in Ghana. *Agriculture* 6:32. doi: 10.3390/agriculture6030032.

Caillon, S., G. Cullman, B. Verschuuren, and E. J. Sterling. 2017. Moving beyond the Human–Nature Dichotomy through Biocultural Approaches: Including Ecological Well-Being in Resilience Indicators. *Ecology and Society* 22.

Caillon, S., and V. Lanouguère-Bruneau. 2005. Gestion de l'agrobiodiversité dans un village de Vanua Lava (Vanuatu) : stratégies de sélection et enjeux sociaux. *Journal de la Société des Océanistes*:129–148. doi: 10.4000/jso.451.

Cairns, M. 2007. *Voices from the Forest: Integrating Indigenous Knowledge Into Sustainable Upland Farming*. Earthscan.

Calvet-Mir, L., and M. Salpeteur. 2016. Humans, Plants, and Networks: A Critical Review. *Environment and Society* 7:107–128. doi: 10.3167/ares.2016.070107.

Camou-Guerrero, A., V. Reyes-García, M. Martínez-Ramos, and A. Casas. 2008. Knowledge and Use Value of Plant Species in a Rarámuri Community: A Gender Perspective for Conservation. *Human Ecology* 36:259–272. doi: 10.1007/s10745-007-9152-3.

Carrière, S. 2002. Orphan Trees of the Forest: Why Do Ntumu Farmers of Southern Cameroon Protect Trees in Their Swidden Fields? *Journal of Ethnobiology* 22:133–162.

Carrière, S. 2003. *Les orphelins de la forêt: pratiques paysannes et écologie forestière (Ntumu, Sud-Cameroun)*. IRD Editions.

Carrière, S., H. Andrianotahiananahary, N. Ranaivoarivelo, and J. Randriamalala. 2005. Savoirs et Usages Des Recrus Post-Agricoles Du Pays Betsileo : Valorisation d'une Biodiversité Oubliée à Madagascar. *VertigO* 6. doi: 10.4000/vertigo.3047.

Carrière, S., and M. Castro Carreno. 2003. Quand les Ntumu lèvent les yeux vers le ciel, des perceptions de la forêt aux utilisations agricoles au Sud-Cameroun. *Journal des africanistes* 73:95–110. doi: 10.3406/jafr.2003.1329.

Carrière, S. M., H. Randriambanona, V. Labeyrie, D. Hervé, J. Mariel, S. Razanaka, and J. R. Randriamalala. 2022. Biocultural Landscapes Diversity Shaped by Agricultural Systems in Madagascar. In *The New Natural History of Madagascar*.

Cassart, B., A. Angbonga Basia, M. Jonard, and Q. Ponette. 2020. Average Leaf Litter Quality Drives the Decomposition of Single-Species, Mixed-Species and Transplanted Leaf Litters for Two Contrasting Tropical Forest Types in the Congo Basin (DRC). *Annals of Forest Science* 77:33. doi: 10.1007/s13595-020-00942-4.

Célérier, J. 1932. Les exportations de Madagascar. *Annales de géographie* 41:333–334.

Cerda, R., C. Allinne, C. Gary, P. Tixier, C. A. Harvey, L. Krolczyk, C. Mathiot, E. Clément, J.-N. Aubertot, and J. Avelino. 2017. Effects of Shade, Altitude and Management on Multiple Ecosystem Services in Coffee Agroecosystems. *European Journal of Agronomy* 82:308–319. doi: 10.1016/j.eja.2016.09.019.

Cerdán, C. R., M. C. Rebolledo, G. Soto, B. Rapidel, and F. L. Sinclair. 2012. Local Knowledge of Impacts of Tree Cover on Ecosystem Services in Smallholder Coffee Production Systems. *Agricultural Systems* 110:119–130. doi: 10.1016/j.agsy.2012.03.014.

Chabrolin, R. 1965. La Riziculture de Tavy à Madagascar. 1:9–23.

Chalmin, P., and Y. Jégourel. 2019. Vanille & clous de giroflie. *Economica*.

Chaplin-Kramer, R., M. E. O'Rourke, E. J. Blitzer, and C. Kremen. 2011. A Meta-Analysis of Crop Pest and Natural Enemy Response to Landscape Complexity. *Ecology Letters* 14:922–932. doi: 10.1111/j.1461-0248.2011.01642.x.

Chevalier, A. 1946. L'évolution de la culture du Caféier à Madagascar. *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée* 26:390–398. doi: 10.3406/jatba.1946.1980.

Chu, C., P. E. Mortimer, H. Wang, Y. Wang, X. Liu, and S. Yu. 2014. Allelopathic Effects of Eucalyptus on Native and Introduced Tree Species. *Forest Ecology and Management* 323:79–84. doi: 10.1016/j.foreco.2014.03.004.

Clough, Y., J. Barkmann, J. Juhrbandt, M. Kessler, T. C. Wanger, A. Anshary, D. Buchori, D. Cicuzza, K. Darras, and D. D. Putra. 2011. Combining High Biodiversity with High Yields in Tropical Agroforests. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108:8311–8316.

Clough, Y., D. Dwi Putra, R. Pitopang, and T. Tscharntke. 2009. Local and Landscape Factors Determine Functional Bird Diversity in Indonesian Cacao Agroforestry. *Biological Conservation* 142:1032–1041. doi: 10.1016/j.biocon.2008.12.027.

Cocoual, M., and P. Danthu. 2018. Le Giroflier à Madagascar : Essai d'histoire et de Géographie Coloniales 1896-1958. *Revue de Géographie Historique*.

Coe, R., F. Sinclair, and E. Barrios. 2014. Scaling up Agroforestry Requires Research 'in' Rather than 'for' Development. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 6:73–77. doi: 10.1016/j.cosust.2013.10.013.

Congretel, M. 2017, June 15. *Une Plante, Des Fils et Des Clones. Histoires Amazoniennes de Guaraná(s) Dans Un Monde Globalisé*. These de doctorat, Université Paris-Saclay (ComUE).

Congretel, M., and F. Pinton. 2020. Local Knowledge, Know-How and Knowledge Mobilized in a Globalized World: A New Approach of Indigenous Local Ecological Knowledge. *People and Nature* 2:527–543. doi: https://doi.org/10.1002/pan3.10142.

Conley, T., and U. Christopher. 2001. Social Learning Through Networks: The Adoption of New Agricultural Technologies in Ghana. *American Journal of Agricultural Economics* 83:668–673. doi: 10.1111/0002-9092.00188.

Conte, C. A. 2019. Turning the Tree Plantations of Slavery into Agroforests for Everyman: A Piece of Landscape History from Pemba Island, Zanzibar. *Agricultural History* 93:581–607. doi: 10.3098/ah.2019.093.4.581.

Coomes, O. T. 2010. Of Stakes, Stems, and Cuttings: The Importance of Local Seed Systems in Traditional Amazonian Societies. *The Professional Geographer* 62:323–334. doi: 10.1080/00330124.2010.483628.

Coomes, O. T., and G. J. Burt. 2001. Peasant Charcoal Production in the Peruvian Amazon: Rainforest Use and Economic Reliance. *Forest Ecology and Management* 140:39–50. doi: 10.1016/S0378-1127(00)00274-7.

Coomes, O. T., S. J. McGuire, E. Garine, S. Caillon, D. McKey, E. Demeulenaere, D. Jarvis, G. Aistara, A. Barnaud, P. Clouvel, L. Emperaire, S. Louafi, P. Martin, F. Massol, M. Pautasso, C. Violon, and J. Wencélius. 2015. Farmer Seed Networks Make a Limited Contribution to Agriculture? Four Common Misconceptions. *Food Policy* 56:41–50. doi: 10.1016/j.foodpol.2015.07.008.

Coomes, O. T., and B. C. Miltner. 2017. Indigenous Charcoal and Biochar Production: Potential for Soil Improvement under Shifting Cultivation Systems. *Land Degradation & Development* 28:811–821. doi: 10.1002/ldr.2500.

Crona, B., and Ö. Bodin. 2006. What You Know Is Who You Know? Communication Patterns Among Resource Users as a Prerequisite for Co-Management. *Ecology and Society* 11. doi: 10.5751/ES-01793-110207.

Cumming, G. S., and G. D. Peterson. 2017. Unifying Research on Social–Ecological Resilience and Collapse. *Trends in Ecology & Evolution* 32:695–713. doi: 10.1016/j.tree.2017.06.014.

Dabat, M.-H., O. Jenn-Treyer, S. Razafimandimby, and L. Bockel. 2008a. L'histoire inachevée de la régulation du marché du riz à Madagascar. *Économie rurale*:75–89. doi: 10.4000/economierurale.535.

Dabat, M.-H., B. Pons, and S. Razafimandimby. 2008b. Des consommateurs malgaches sensibles à la qualité du riz. *Économie rurale*:6–18. doi: 10.4000/economierurale.330.

Dale, S. E., B. L. Turner, and R. D. Bardgett. 2015. Isolating the Effects of Precipitation, Soil Conditions, and Litter Quality on Leaf Litter Decomposition in Lowland Tropical Forests. *Plant and Soil* 394:225–238. doi: 10.1007/s11104-015-2511-8.

Dandoy. 1973. Territoires et Économies Villageoises de La Région de Vavatenina (Côte Orientale Malgache). In *Atlas Des Structures Agraires à Madagascar*, p. 94, La Haye. MOUTON & CO, Paris.

D'Andrade, R. G. 1995. *The Development of Cognitive Anthropology*. Cambridge University Press.

Danthu, P., I. Michel, S. M. Carrière, V. Labeyrie, B. Rakouth, J. Sarron, J. Mariel, D. Lasserre, and E. Penot. 2022. Coming from Elsewhere: The Preponderance of Introduced Plant Species in Agroforestry Systems on the East Coast of Madagascar. *Agroforestry Systems*. doi: 10.1007/s10457-022-00732-z.

Danthu, P., E. Penot, K. M. Ranoarisoa, J.-C. Rakotondravelo, I. Michel, M. Tiollier, T. Michels, F. Normand, D. E. N. G. Razafimamonjison, and F. Fawbush. 2014. The Clove Tree of Madagascar, a Success Story with an Unpredictable Future. *Bois et forêts des tropiques*:83–96.

Danthu, P., H. Razakamanarivo, B. Deville-Danthu, L. Razafy Fara, Y. Le Roux, and É. Penot. 2016. La courte histoire oubliée du caoutchouc à Madagascar: la première controverse entre conservation de la biodiversité et exploitation des ressources naturelles. *Bois & Forêts des Tropiques* 328:27–43. doi: 10.19182/bft2016.328.a31300.

Darnhofer, I., S. Bellon, B. Dedieu, and R. Milestad. 2010. Adaptiveness to Enhance the Sustainability of Farming Systems. A Review. *Agronomy for Sustainable Development* 30:545–555. doi: 10.1051/agro/2009053.

Davidson-Hunt, I. 2000. Ecological Ethnobotany: Stumbling toward New Practices and Paradigms. *MASA Journal* 16:1–13.

Dawoe, E. K., J. Quashie-Sam, M. E. Isaac, and S. K. Oppong. 2012. Exploring Farmers' Local Knowledge and Perceptions of Soil Fertility and Management in the Ashanti Region of Ghana. *Geoderma* 179–180:96–103. doi: 10.1016/j.geoderma.2012.02.015.

De Beenhouwer, M., R. Aerts, and O. Honnay. 2013. A Global Meta-Analysis of the Biodiversity and Ecosystem Service Benefits of Coffee and Cacao Agroforestry. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 175:1–7. doi: 10.1016/j.agee.2013.05.003.

Decary, R. 1937. Les débuts de la colonisation agricole à l'Ile Sainte-Marie de Madagascar. *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée* 17:610–618. doi: 10.3406/jatba.1937.5775.

Decary, R. 1962. Les emplois du Bambou à Madagascar. *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée* 9:65–70. doi: 10.3406/jatba.1962.2657.

Defos du Rau, J. 1959. Les migrations intérieures à Madagascar, d'après M. Hubert Deschamps. *Les Cahiers d'Outre-Mer* 12:407–412. doi: 10.3406/caoum.1959.2139.

DeFries, R., and C. Rosenzweig. 2010. Toward a Whole-Landscape Approach for Sustainable Land Use in the Tropics. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107:19627–19632. doi: 10.1073/pnas.1011163107.

Deletre, M., D. B. McKey, and T. R. Hodkinson. 2011. Marriage Exchanges, Seed Exchanges, and the Dynamics of Manioc Diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108:18249–18254. doi: 10.1073/pnas.1106259108.

Delgado, M. E. M., and F. Canters. 2012. Modeling the Impacts of Agroforestry Systems on the Spatial Patterns of Soil Erosion Risk in Three Catchments of Claveria, the Philippines. *Agroforestry Systems* 85:411–423. doi: 10.1007/s10457-011-9442-z.

Dez, J. 1966. Les Feux de Végétation: Aperçus Psycho-Sociologiques. *Bulletin de Madagascar* 247:9.

Díaz, S., U. Pascual, M. Stenseke, B. Martín-López, R. T. Watson, Z. Molnár, R. Hill, K. M. A. Chan, I. A. Baste, K. A. Brauman, S. Polasky, A. Church, M. Lonsdale, A. Larigauderie, P. W. Leadley, A. P. E. van Oudenhoven, F. van der Plaat, M. Schröter, S. Lavorel, Y. Aumeeruddy-Thomas, E. Bukvareva, K. Davies, S. Demissew, G. Erpul, P. Failler, C. A. Guerra, C. L. Hewitt, H. Keune, S. Lindley, and Y. Shirayama. 2018. Assessing Nature's Contributions to People. *Science* 359:270–272. doi: 10.1126/science.aap8826.

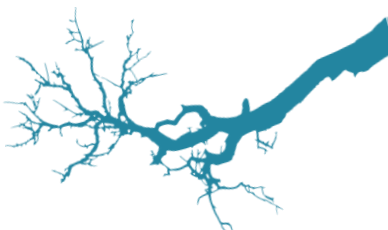
Donque. 1975. Les Cyclones Tropicaux Des Mars Malgaches. *Madagascar Revue Géographique*:55.

Douzant-Rosenfeld, D., and P. Grandjean. 2007. Planteurs et plantations. *Études rurales*:69–84. doi: 10.4000/etudesrurales.8516.

Droy, I., B. N. Rabevohitra, and J.-É. Bidou. 2017. L'encastrement des vulnérabilités : exemple du « pays du girofle » sur la côte orientale de Madagascar. *Mondes en développement* n° 180:69. doi: 10.3917/med.180.0069.

Duarte, G. T., P. M. Santos, T. G. Cornelissen, M. C. Ribeiro, and A. P. Paglia. 2018. The Effects of Landscape Patterns on Ecosystem Services: Meta-Analyses of Landscape Services. *Landscape Ecology* 33:1247–1257. doi: 10.1007/s10980-018-0673-5.





Dubois, J., and H. Ranaivosoa. 1966. Chrysotypus mabilianum Viette chenille mineuse du giroflier (Andretra). Biologie et lutte mécanique. *L'Agronomie Tropicale. Série 3, Agronomie Générale. Etudes Scientifiques.*

Dufumier, M. 2006. Diversité des exploitations agricoles et pluriactivité des agriculteurs dans le Tiers Monde. *Cahiers Agricultures* 15:584–588 (1). doi: 10.1684/agr.2006.0028.

Duguma, D. L. A. 2010. Agroforestry as a Tool for Integrated Land Resources Mangement: Improving Farmers' Livelihood, Providing Wood Products and Minimizing Forest Encroachment. :43.

Dumont, R. P. 1959. L'aménagement Du Lac Alaotra. Evolution Des Campagnes Malgaches. *Imprimerie Officielle, Tananarive*:93–115.

Dung, L. C., C. T. Hoanh, C. Le Page, F. Bousquet, and N. Gajaseni. 2009. Facilitating Dialogue between Aquaculture and Agriculture: Lessons from Role-Playing Games with Farmers in the Mekong Delta, Vietnam. *Water Policy* 11:80–93. doi: 10.2166/wp.2009.105.

Duru, M., O. Therond, and M. Fares. 2015. Designing Agroecological Transitions; A Review. *Agronomy for Sustainable Development* 35:1237–1257. doi: 10.1007/s13593-015-0318-x.

Ehrenbergerová, L., E. Cienciala, A. Kučera, L. Guy, and H. Habrová. 2016. Carbon Stock in Agroforestry Coffee Plantations with Different Shade Trees in Villa Rica, Peru. *Agroforestry Systems* 90:433–445. doi: 10.1007/s10457-015-9865-z.

Emborg, J., G. Walker, and S. Daniels. 2012. Forest Landscape Restoration Decision-Making and Conflict Management: Applying Discourse-Based Approaches. In *Forest Landscape Restoration: Integrating Natural and Social Sciences*, edited by J. Stanturf, D. Lamb, and P. Madsen, pp. 131–153. Springer Netherlands, Dordrecht. doi: 10.1007/978-94-007-5326-6_7.

Erdmann, T. K. 2005. Agroforestry as a Tool for Restoring Forest Landscapes. In *Forest Restoration in Landscapes: Beyond Planting Trees*, edited by S. Mansourian, D. Vallauri, and N. Dudley, pp. 274–284. Springer, New York, NY. doi: 10.1007/0-387-29112-1_40.

Étienne, M. (Ed.). 2010. *La modélisation d'accompagnement: Une démarche participative en appui au développement durable.* éditions Quae. doi: 10.35690/978-2-7592-0621-6.

Fahrig, L., J. Baudry, L. Brotons, F. G. Burel, T. O. Crist, R. J. Fuller, C. Sirami, G. M. Siriwardena, and J.-L. Martin. 2011. Functional Landscape Heterogeneity and Animal Biodiversity in Agricultural Landscapes. *Ecology Letters* 14:101–112. doi: 10.1111/j.1461-0248.2010.01559.x.

Fahrig, L., and W. K. Nuttle. 2005. Population Ecology in Spatially Heterogeneous Environments. In *Ecosystem Function in Heterogeneous Landscapes*, edited by G. M. Lovett, M. G. Turner, C. G. Jones, and K. C. Weathers, pp. 95–118. Springer New York, New York, NY. doi: 10.1007/0-387-24091-8_6.

FAO. 1984. *Improved Production Systems as an Alternative to Shifting Cultivation.* FAO, Rome, Italy.

FAO. 2018. *Rapport Spécial - Mission FAO/PAM d'évaluation des récoltes et de la sécurité alimentaire à Madagascar.* FAO, Rome, Italy.

FAO. 2020. *Évaluation des ressources forestières mondiales 2020: Principaux résultats.* FAO, Rome, Italy. doi: 10.4060/ca8753fr.

Fauvelle, É., and C. Garcia. 2018. AgriForEst : un jeu pour élaborer des scénarios sur un terroir villageois d'Afrique Centrale. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement.* doi: 10.4000/vertigo.23245.

Fischer, J., D. B. Lindenmayer, and A. D. Manning. 2006. Biodiversity, Ecosystem Function, and Resilience: Ten Guiding Principles for Commodity Production Landscapes. *Frontiers in Ecology and the Environment* 4:80–86. doi: 10.1890/1540-9295(2006)004[0080:BEFART]2.0.CO;2.

Flynn, D. F. B., M. Gogol-Prokurat, T. Nogeire, N. Molinari, B. T. Richers, B. B. Lin, N. Simpson, M. M. Mayfield, and F. DeClerck. 2009. Loss of Functional Diversity under Land Use Intensification across Multiple Taxa. *Ecology Letters* 12:22–33. doi: 10.1111/j.1461-0248.2008.01255.x.

Foley, J. A., G. P. Asner, M. H. Costa, M. T. Coe, R. DeFries, H. K. Gibbs, E. A. Howard, S. Olson, J. Patz, N. Ramankutty, and P. Snyder. 2007. Amazonia Revealed: Forest Degradation and Loss of Ecosystem Goods and Services in the Amazon Basin. *Frontiers in Ecology and the Environment* 5:25–32. doi: 10.1890/1540-9295(2007)5[25:ARFDAL]2.0.CO;2.

Foley, J. A., N. Ramankutty, K. A. Brauman, E. S. Cassidy, J. S. Gerber, M. Johnston, N. D. Mueller, C. O'Connell, D. K. Ray, P. C. West, C. Balzer, E. M. Bennett, S. R. Carpenter, J. Hill, C. Monfreda, S. Polasky, J. Rockström, J. Sheehan, S. Siebert, D. Tilman, and D. P. M. Zaks. 2011. Solutions for a Cultivated Planet. *Nature* 478:337–342. doi: 10.1038/nature10452.

Folke, C. 2004. Traditional Knowledge in Social Ecological Systems. *Ecology and Society* 9:art7. doi: 10.5751/ES-01237-090307.

Folke, C., S. Carpenter, B. Walker, M. Scheffer, T. Chapin, and J. Rockström. 2010. Resilience Thinking: Integrating Resilience, Adaptability and Transformability. *Ecology and Society* 15. doi: 10.5751/ES-03610-150420.

Forman, R. T. T., and M. Godron. 1981. Patches and Structural Components for A Landscape Ecology. *BioScience* 31:733–740. doi: 10.2307/1308780.

Foster, A. D., and M. R. Rosenzweig. 1995. Learning by Doing and Learning from Others: Human Capital and Technical Change in Agriculture. doi: 10.1086/601447.

Frake, C. O., and H. C. Conklin. 1962. The Ethnographic Study of Cognitive Systems. doi: 10.1037/e596342011-004.

François, E. 1927. La production des fruits à Madagascar. *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée* 7:713–724. doi: 10.3406/jatba.1927.4576.

François, E., and A. Ledreux. 1929. La culture des Caféiers à Madagascar. *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée* 9:241–249. doi: 10.3406/jatba.1929.4727.

Frappa, C. 1954. Sur La Chenille de Thyrididæ Du Genre Chrysotypus Nuisible Au Giroflier Sur La Côte Est de Madagascar. *Bulletin de Madagascar* 95:280–287.

Fremigacci, J. 1986. Les difficultés d'une politique coloniale : le café de Madagascar à la conquête du marché français (1930-1938). *Outre-Mers. Revue d'histoire* 73:143–166. doi: 10.3406/outre.1986.2522.

Fujisaka, S. 1986. Pioneer Shifting Cultivation, Farmer Knowledge, and an Upland Ecosystem : Co-Evolution and Systems Sustainability in Calminoe, Philippines. *Philippine Quarterly of Culture and Society* 14:137–164.

Gafsi, M. 2017. Les stratégies de diversification des exploitations agricoles. Enseignements théoriques et empiriques. *Économie rurale. Agricultures, alimentations, territoires* :43–63. doi: 10.4000/economierurale.5257.

Galaso, P. 2018. Network Topologies as Collective Social Capital in Cities and Regions: A Critical Review of Empirical Studies. *European Planning Studies* 26:571–590. doi: 10.1080/09654313.2017.1406898.

Galliéni, J. S. 1908. *Neuf Ans à Madagascar*, Librairie Hachette. Paris.

Gámez-Virués, S., D. J. Perović, M. M. Gossner, C. Börschig, N. Blüthgen, H. de Jong, N. K. Simons, A.-M. Klein, J. Krauss, G. Maier, C. Scherber, J. Steckel, C. Rothenwöhrer, I. Steffan-Dewenter, C. N. Weiner, W. Weisser, M. Werner, T. Tscharntke, and C. Westphal. 2015. Landscape Simplification Filters Species Traits and Drives Biotic Homogenization. *Nature Communications* 6:8568. doi: 10.1038/ncomms9568.

Gannon, F., and F. Sandron. 2006. Echange, réciprocité et innovation dans une communauté paysanne. Une lecture conventionnaliste. *Économie rurale* :50–67. doi: 10.4000/economierurale.741.

Ganzhorn, J. U., P. P. Lowry, G. E. Schatz, and S. Sommer. 2001. The Biodiversity of Madagascar: One of the World's Hottest Hotspots on Its Way Out. *Oryx* 35:346–348. doi: 10.1046/j.1365-3008.2001.00201.x.

Garcia, C. A., S. A. Bhagwat, J. Ghazoul, C. D. Nath, K. M. Nanaya, C. G. Kushalappa, Y. Raghuramulu, R. Nasi, and P. Vaast. 2010. Biodiversity Conservation in Agricultural Landscapes: Challenges and Opportunities of Coffee Agroforests in the Western Ghats, India. *Conservation Biology* 24:479–488. doi: 10.1111/j.1523-1739.2009.01386.x.

Garcia, C. A., J. Vendé, N. Konerira, J. Kalla, M. Nay, A. Dray, M. Delay, P. O. Waeber, N. Stoudmann, A. Bose, C. Le Page, Y. Raghuram, R. Bagchi, J. Ghazoul, C. G. Kushalappa, and P. Vaast. 2020. Coffee, Farmers, and Trees—Shifting Rights Accelerates Changing Landscapes. *Forests* 11:480. doi: 10.3390/f11040480.

Gardner, C. J., M. E. Nicoll, C. Birkinshaw, A. Harris, R. E. Lewis, D. Rakotomalala, and A. N. Ratsifandrihamanana. 2018. The Rapid Expansion of Madagascar's Protected Area System. *Biological Conservation* 220:29–36. doi: 10.1016/j.biocon.2018.02.011.

Garibaldi, A., and N. Turner. 2004. Cultural Keystone Species: Implications for Ecological Conservation and Restoration. *Ecology and Society* 9:art1. doi: 10.5751/ES-00669-090301.

Garibaldi, L. A., L. G. Carvalheiro, S. D. Leonhardt, M. A. Aizen, B. R. Blaauw, R. Isaacs, M. Kuhlmann, D. Kleijn, A. M. Klein, C. Kremen, L. Morandin, J. Scheper, and R. Winfree. 2014. From Research to Action: Enhancing Crop Yield through Wild Pollinators. *Frontiers in Ecology and the Environment* 12:439–447. doi: 10.1890/130330.

Garibaldi, L. A., I. Steffan-Dewenter, C. Kremen, J. M. Morales, R. Bommarco, S. A. Cunningham, L. G. Carvalheiro, N. P. Chacoff, J. H. Dudenhöffer, S. S. Greenleaf, A. Holzschuh, R. Isaacs, K. Krewenka, Y. Mandelik, M. M. Mayfield, L. A. Morandin, S. G. Potts, T. H. Ricketts, H. Szentgyörgyi, B. F. Viana, C. Westphal, R. Winfree, and A. M. Klein. 2011. Stability of Pollination Services Decreases with Isolation from Natural Areas despite Honey Bee Visits. *Ecology Letters* 14:1062–1072. doi: 10.1111/j.1461-0248.2011.01669.x.

Garrity, D. P., and A. Khan. 1994. Alternatives to Slash-and-Burn: A Global Initiative. A Summary Report of a Research Methodology Workshop. ICRAF.

Gay-des-Combes, J. M., B. J. M. Robroek, D. Hervé, T. Guillaume, C. Pistocchi, R. T. E. Mills, and A. Buttler. 2017. Slash-and-Burn Agriculture and Tropical Cyclone Activity in Madagascar: Implication for Soil Fertility Dynamics and Corn Performance. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 239:207–218. doi: 10.1016/j.agee.2017.01.010.

Gérard, A., J. U. Ganzhorn, C. A. Kull, and S. M. Carrière. 2015. Possible Roles of Introduced Plants for Native Vertebrate Conservation: The Case of Madagascar. *Restoration Ecology* 23:768–775. doi: 10.1111/rec.12246.

Gezon, L. L., and B. Z. Freed. 1999. Agroforestry and Conservation in Northern Madagascar: Hopes and Hinderances. 3:30.

Godoy, R. A. 1992. Determinants of Smallholder Commercial Tree Cultivation. *World Development* 20:713–725. doi: 10.1016/0305-750X(92)90147-N.

Gökyer, E. 2013. *Understanding Landscape Structure Using Landscape Metrics. Advances in Landscape Architecture*. IntechOpen. doi: 10.5772/55758.

Goodman, S. M., and J. P. Benstead. 2005. Updated Estimates of Biotic Diversity and Endemism for Madagascar. *Oryx* 39:73–77. doi: 10.1017/S0030605305000128.

Gouzien, Q., E. Penot, M. Jahiel, and P. Danthu. 2016. Le Girofle : poids dans l'économie malgache et place de Madagascar dans le marché mondial. monograph. https://agritrop.cirad.fr/582468/. Accessed February 6, 2022.

Graefe, S., L. F. Meyer-Sand, K. Chauvette, I. Abdulai, L. Jassogne, P. Vaast, and R. Asare. 2017. Evaluating Farmers' Knowledge of Shade Trees in Different Cocoa Agro-Ecological Zones in Ghana. *Human Ecology* 45:321–332. doi: 10.1007/s10745-017-9899-0.

Greiner, C., and P. Sakdapolrak. 2013. Rural–Urban Migration, Agrarian Change, and the Environment in Kenya: A Critical Review of the Literature. *Population and Environment* 34:524–553. doi: 10.1007/s11111-012-0178-0.

Griffith, D. M. 2000. Agroforestry: A Refuge for Tropical Biodiversity after Fire. *Conservation Biology* 14:325–326. doi: 10.1046/j.1523-1739.2000.99101.x.

Grossman, J. M. 2003. Exploring Farmer Knowledge of Soil Processes in Organic Coffee Systems of Chiapas, Mexico. *Geoderma* 111:267–287. doi: 10.1016/S0016-7061(02)00268-9.

Guzmán, A., A. Link, J. A. Castillo, and J. E. Botero. 2016. Agroecosystems and Primate Conservation: Shade Coffee as Potential Habitat for the Conservation of Andean Night Monkeys in the Northern Andes. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 215:57–67. doi: 10.1016/j.agee.2015.09.002.

Halbrendt, J., S. A. Gray, S. Crow, T. Radovich, A. H. Kimura, and B. B. Tamang. 2014. Differences in Farmer and Expert Beliefs and the Perceived Impacts of Conservation Agriculture. *Global Environmental Change* 28:50–62. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2014.05.001.

Hänke, H., J. Barkmann, L. Blum, Y. Franke, D. A. Martin, J. Niens, K. Osen, V. Uruena, S. A. Witherspoon, and A. Wurz. 2018. *Socio-Economic, Land Use and Value Chain Perspectives on Vanilla Farming in the SAVA Region (North-Eastern Madagascar): The Diversity Turn Baseline Study (DTBS)*. Working Paper, Diskussionsbeitrag.

Hanspach, J., L. Jamila Haider, E. Oteros-Rozas, A. Stahl Olafsson, N. M. Gulsrud, C. M. Raymond, M. Toralba, B. Martín-López, C. Bieling, M. García-Martín, C. Albert, T. H. Beery, N. Fagerholm, I. Díaz-Reviriego, A. Drews-Shambroom, and T. Plieninger. 2020. Biocultural Approaches to Sustainability: A Systematic Review of the Scientific Literature. *People and Nature* n/a. doi: 10.1002/pan3.10120.

Haralick, R. M., K. Shanmugam, and I. Dinstein. 1973. Textural Features for Image Classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* SMC-3:610–621. doi: 10.1109/TSMC.1973.4309314.

Hariyadi, B., and T. Ticktin. 2012. From Shifting Cultivation to Cinnamon Agroforestry: Changing Agricultural Practices Among the Serampas in the Kerinci Seblat National Park, Indonesia. *Hum Ecol*:11.

Harvey, C. A., and J. A. González Villalobos. 2007. Agroforestry Systems Conserve Species-Rich but Modified Assemblages of Tropical Birds and Bats. *Biodiversity and Conservation* 16:2257–2292. doi: 10.1007/s10531-007-9194-2.

Hill, R., Ç. Adem, W. V. Alangui, Z. Molnár, Y. Aumeeruddy-Thomas, P. Bridgewater, M. Tengö, R. Thaman, C. Y. Adou Yao, F. Berkes, J. Carino, M. Carneiro da Cunha, M. C. Diaw, S. Díaz, V. E. Figueroa, J. Fisher, P. Hardison, K. Ichikawa, P. Kariuki, M. Karki, P. O. Lyver, P. Malmer, O. Masardule, A. A. Oteng Yeboah, D. Pacheco, T. Pataridze, E. Perez, M.-M. Roué, H. Roba, J. Rubis, O. Saito, and D. Xue. 2020. Working with Indigenous, Local and Scientific Knowledge in Assessments of Nature and Nature's Linkages with People. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 43:8–20. doi: 10.1016/j.cosust.2019.12.006.

Hillbrand, A., S. Borelli, M. Conigliaro, and E. Olivier. 2017. Agroforestry for Landscape Restoration: Exploring the Potential of Agroforestry to Enhance the Sustainability and Resilience of Degraded Landscapes.

Hillyer, A. E. M., J. F. McDonagh, and A. Verlinden. 2006. Land-Use and Legumes in Northern Namibia—The Value of a Local Classification System. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 117:251–265. doi: 10.1016/j.agee.2006.04.008.

Hladik, A., P. Blanc, N. Dumetz, V. Jeannoda, N. Rabenandrianina, and C. M. Hladik. 2000. Données Sur La Répartition Géographique Du Genre Ravenala et Sur Son Rôle Dans La Dynamique Forestière à Madagascar. *Mémoires de la Société de Biogéographie de Paris*:93–104.

Hoang, L. A., J.-C. Castella, and P. Novosad. 2006. Social Networks and Information Access: Implications for Agricultural Extension in a Rice Farming Community in Northern Vietnam. *Agriculture and Human Values* 23:513–527. doi: 10.1007/s10460-006-9013-5.

Hong, S.-K. 2014. Philosophy and Background of Biocultural Landscapes. In *Biocultural Landscapes: Diversity, Functions and Values*, edited by S.-K. Hong, J. Bogaert, and Q. Min, pp. 1–7. Springer Netherlands, Dordrecht. doi: 10.1007/978-94-017-8941-7_1.

Hougni, D.-G. J. M., B. Chambon, E. Penot, and A. Promkhambut. 2018. The Household Economics of Rubber Intercropping during the Immature Period in Northeast Thailand. *Journal of Sustainable Forestry* 37:787–803. doi: 10.1080/10549811.2018.1486716.

Hunn, E. 2007. Ethnobiology in Four Phases. *Journal of Ethnobiology* 27:1–10. doi: 10.2993/0278-0771(2007)27[1:EIFP]2.0.CO;2.

Huynh, H. T. N., L. A. Lobry de Bruyn, O. G. G. Knox, and H. T. T. Hoang. 2021. Local Soil Knowledge, Sustainable Agriculture and Soil Conservation in Central Vietnam. *Geoderma Regional* 25:e00371. doi: 10.1016/j.geodrs.2021.e00371.

Isaac, M. E. 2012. Agricultural Information Exchange and Organizational Ties: The Effect of Network Topology on Managing Agrodiversity. *Agricultural Systems* 109:9–15. doi: 10.1016/j.agsy.2012.01.011.

Isaac, M. E., L. C. N. Anglaaere, D. S. Akoto, and E. Dawoe. 2014. Migrant Farmers as Information Brokers: Agroecosystem Management in the Transition Zone of Ghana. *Ecology and Society* 19.

Isaac, M. E., R. Cerda, B. Rapidel, A. R. Martin, A. K. Dickinson, and N. Sibelet. 2018. Farmer Perception and Utilization of Leaf Functional Traits in Managing Agroecosystems. *Journal of Applied Ecology* 55:69–80. doi: 10.1111/1365-2664.13027.

Isaac, M. E., E. Dawoe, and K. Sieciechowicz. 2009. Assessing Local Knowledge Use in Agroforestry Management with Cognitive Maps. *Environmental Management* 43:1321–1329. doi: 10.1007/s00267-008-9201-8.

Isaac, M. E., B. H. Erickson, S. J. Quashie-Sam, and V. R. Timmer. 2007. Transfer of Knowledge on Agroforestry Management Practices: The Structure of Farmer Advice Networks. *Ecology and Society* 12. doi: 10.5751/ES-02196-120232.

Isaac, M. E., and P. Matous. 2017. Social Network Ties Predict Land Use Diversity and Land Use Change: A Case Study in Ghana. *Regional Environmental Change* 17:1823–1833. doi: 10.1007/s10113-017-1151-3.

Isbell, F., P. R. Adler, N. Eisenhauer, D. Fornara, K. Kimmel, C. Kremen, D. K. Letourneau, M. Liebman, H. W. Polley, S. Quijas, and M. Scherer-Lorenzen. 2017. Benefits of Increasing Plant Diversity in Sustainable Agroecosystems. *Journal of Ecology* 105:871–879. doi: 10.1111/1365-2745.12789.

Isnard, H. 1951. La colonisation agricole à Madagascar. *Revue de Géographie Alpine* 39:97–125. doi: 10.3406/rga.1951.4134.

Jackson, L. E., U. Pascual, and T. Hodgkin. 2007. Utilizing and Conserving Agrobiodiversity in Agricultural Landscapes. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 121:196–210. doi: 10.1016/j.agee.2006.12.017.

Jackson, L., M. van Noordwijk, J. Bengtsson, W. Foster, L. Lipper, M. Pulleman, M. Said, J. Snaddon, and R. Vodouhe. 2010. Biodiversity and Agricultural Sustainagility: From Assessment to Adaptive Management. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 2:80–87. doi: 10.1016/j.cosust.2010.02.007.

Jacob, G. 1987. Gallieni et « l'impôt moralisateur » à Madagascar. Théorie, pratiques et conséquences (1901-1905). *Outre-Mers. Revue d'histoire* 74:431–473. doi: 10.3406/outre.1987.2617.

Jacobi, J., S.-L. Mathez-Stiefel, H. Gambon, S. Rist, and M. Altieri. 2017. Whose Knowledge, Whose Development? Use and Role of Local and External Knowledge in Agroforestry Projects in Bolivia. *Environmental Management* 59:464–476. doi: 10.1007/s00267-016-0805-0.

Jagoret, P., J. Kwesseu, C. Messie, I. Michel-Dounias, and E. Malézieux. 2014. Farmers' Assessment of the Use Value of Agrobiodiversity in Complex Cocoa Agroforestry Systems in Central Cameroon. *Agroforestry Systems* 88:983–1000. doi: 10.1007/s10457-014-9698-1.

Jagoret, P., I. Michel-Dounias, and E. Malézieux. 2011. Long-Term Dynamics of Cocoa Agroforests: A Case Study in Central Cameroon. *Agroforestry Systems* 81:267–278. doi: 10.1007/s10457-010-9368-x.

Jagoret, P., H. T. Ngnogue, E. Malézieux, and I. Michel. 2018. Trajectories of Cocoa Agroforests and Their Drivers over Time: Lessons from the Cameroonian Experience. *European Journal of Agronomy* 101:183–192. doi: 10.1016/j.eja.2018.09.007.

Jahandideh-Tehrani, M., H. Zhang, F. Helfer, and Y. Yu. 2019. Review of Climate Change Impacts on Predicted River Streamflow in Tropical Rivers. *Environmental Monitoring and Assessment* 191. doi: 10.1007/s10661-019-7841-1.

Jahiel, M., C. Andreas, and E. Penot. 2014. Experience from Fifteen Years of Malagasy Lychee Export Campaigns. *Fruits* 69:1–18. doi: 10.1051/fruits/2013098.

Jankowski, F. 2014. La diffusion de savoirs agro-écologiques dans l'état de Oaxaca (Mexique): Efforts de traduction et espaces d'incommensurabilité. *Revue d'anthropologie des connaissances* 8, 3:619. doi: 10.3917/rac.024.0619.

Jankowski, F. and S. Lewandowski. 2017. Apprendre, se positionner, créer : l'hybridation des savoirs au Sud. *Autrepart* 82:3. doi: 10.3917/autr.082.0003.

Janssen, M. A., Ö. Bodin, J. M. Anderies, T. Elmqvist, H. Ernstson, R. R. J. McAllister, P. Olsson, and P. Ryan. 2006. Toward a Network Perspective of the Study of Resilience in Social-Ecological Systems. *Ecology and Society* 11. doi: 10.5751/ES-01462-110115.

Jax, K. 2005. Function and "Functioning" in Ecology: What Does It Mean? *Oikos* 111:641–648. doi: 10.1111/j.1600-0706.2005.13851.x.

Jean-Denis, S., D. Jean-Pierre, M. Mutel, H. Duchaufour, C. Langlais, P. Fernandes, M.-E. Alphonse, and É. Malézieux. 2014. Évolution de la structure d'un système agroforestier en relation avec le cycle de vie familial : cas du jardin de case en Haïti. *BOIS & FORETS DES TROPIQUES* 321:7. doi: 10.19182/bft2014.321.a31213.

Jha, S., and J. H. Vandermeer. 2010. Impacts of Coffee Agroforestry Management on Tropical Bee Communities. *Biological Conservation* 143:1423–1431. doi: 10.1016/j.biocon.2010.03.017.

Johnson, L. M., and E. S. Hunn. 2010. *Landscape Ethnoecology: Concepts of Biotic and Physical Space*. Berghahn Books.

Jongrungrot, V., S. Thungwa, and D. Snoeck. 2014. Tree-Crop Diversification in Rubber Plantations to Diversify Sources of Income for Small-Scale Rubber Farmers in Southern Thailand. *BOIS & FORETS DES TROPIQUES* 321:21. doi: 10.19182/bft2014.321.a31214.

Jose, S. 2009. Agroforestry for Ecosystem Services and Environmental Benefits: An Overview. *Agroforestry Systems* 76:1–10. doi: 10.1007/s10457-009-9229-7.

Jose, S. 2012. Agroforestry for Conserving and Enhancing Biodiversity. *Agroforestry Systems* 85:1–8. doi: 10.1007/s10457-012-9517-5.

Jouve, P. 1999. Dynamiques Agraires et Développement Rural. Pour Une Analyse En Termes de Transition Agraire. CNEARC Montpellier.

Junqueira, A. B. 2015. *Anthropogenic Soils in Central Amazonia: Farmer's Practices, Agrobiodiversity and Land-Use Patterns*.

Jury, M. R. 2003. The Climate of Madagascar. In *The Natural History of Madagascar*, pp. 75–87, Goodman, S.M., Benstead, J.P. University of Chicago, Chicago.

Kamto, M., H. Durrel, E. Ngom, É. Fauvelle, A. Salihovic, and C. Garcia. 2019. Using Role-Play to Explore Strategies for Improving Palm Oil Production and Sustainability in Cameroon. In *Exploring Inclusive Palm Oil Production*, p. 88, Tropenbos International. Wageningen, the Netherlands.

Karltun, E., M. Lemenih, and M. Tolera. 2013. Comparing Farmers' Perception of Soil Fertility Change with Soil Properties and Crop Performance in Beseku, Ethiopia. *Land Degradation & Development* 24:228–235. doi: https://doi.org/10.1002/ldr.1118.

Kawa, N. C., C. McCarty, and C. R. Clement. 2013. Manioc Varietal Diversity, Social Networks, and Distribution Constraints in Rural Amazonia. *Current Anthropology* 54:764–770. doi: 10.1086/673528.

Khoury, C. K., A. D. Bjorkman, H. Dempewolf, J. Ramirez-Villegas, L. Guarino, A. Jarvis, L. H. Rieseberg, and P. C. Struik. 2014. Increasing Homogeneity in Global Food Supplies and the Implications for Food Security. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111:4001–4006. doi: 10.1073/pnas.1313490111.

Kiener, A. 1963. Le" Tavy" à Madagascar. Ses Différentes Formes et Dénominations. Bilan Du Tavy et Problèmes Humains. Moyens de Lutte. *Bois & Forêts des Tropiques* 90:9–16.

Kiptot, E., S. Franzel, P. Hebinck, and P. Richards. 2006. Sharing Seed and Knowledge: Farmer to Farmer Dissemination of Agroforestry Technologies in Western Kenya. *Agroforestry Systems* 68:167–179. doi: 10.1007/s10457-006-9007-8.

Krasilnikov, P. V., and J. A. Tabor. 2003. Perspectives on Utilitarian Ethnopedology. *Geoderma* 111:197–215. doi: 10.1016/S0016-7061(02)00264-1.

Kresna, R. 2021. *Social Capital, Resilience, and Smallholder Dairy Farmers: A Case Study of Four Communities in West Java, Indonesia.* Thesis, University of Otago.

Kull, C. A. 2000. Deforestation, Erosion, and Fire: Degradation Myths in the Environmental History of Madagascar. *Environment and History* 6:423–450. doi: 10.3197/096734000129342361.

Kull, C. A., S. M. Carrière, S. Moreau, H. R. Ramiarantsoa, C. Blanc-Pamard, and J. Tassin. 2013. Melting Pots of Biodiversity: Tropical Smallholder Farm Landscapes as Guarantors of Sustainability. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development* 55:6–16. doi: 10.1080/00139157.2013.765307.

Kull, C. A., J. Tassin, and S. M. Carriere. 2014. Approaching Invasive Species in Madagascar. *Madagascar Conservation & Development* 9:60–70. doi: 10.4314/mcd.v9i2.2.

Labeyrie, V., M. Antona, J. Baudry, D. Bazile, Ö. Bodin, S. Caillon, C. Leclerc, C. Le Page, S. Louafi, J. Mariel, F. Massol, and M. Thomas. 2021a. Networking Agrobiodiversity Management to Foster Biodiversity-Based Agriculture. A Review. *Agronomy for Sustainable Development* 41:4. doi: 10.1007/s13593-020-00662-z.

Labeyrie, V., D. Renard, Y. Aumeeruddy-Thomas, P. Benyei, S. Caillon, L. Calvet-Mir, S. M. Carrière, M. Demongeot, E. Descamps, A. Braga Junqueira, X. Li, J. Locqueville, G. Mattalia, S. Miñarro, A. Morel, A. Porcuna-Ferrer, A. Schlingmann, J. Vieira da Cunha Avila, and V. Reyes-García. 2021b. The Role of Crop Diversity in Climate Change Adaptation: Insights from Local Observations to Inform Decision Making in Agriculture. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 51:15–23. doi: 10.1016/j.cosust.2021.01.006.

Labeyrie, V., S. Caillon, M. Thomas, and M. Salpeteur. 2019. L'analyse de Réseaux : Lier Le Social et l'écologique. In *Méthodes et Interdisciplinarité*, ISTE Group.

Labeyrie, V., B. Rono, and C. Leclerc. 2014. How Social Organization Shapes Crop Diversity: An Ecological Anthropology Approach among Tharaka Farmers of Mount Kenya. *Agriculture and Human Values* 31:97–107. doi: 10.1007/s10460-013-9451-9.

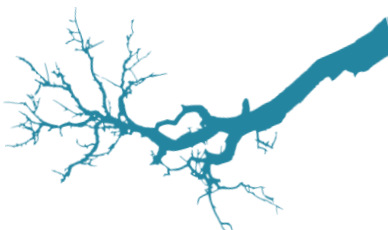
Labeyrie, V., M. Thomas, Z. K. Muthamia, and C. Leclerc. 2016. Seed Exchange Networks, Ethnicity, and Sorghum Diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113:98–103. doi: 10.1073/pnas.1513238112.

Lacerda, A. E. B., A. L. Hanisch, and E. R. Nimmo. 2020. Leveraging Traditional Agroforestry Practices to Support Sustainable and Agrobiodiverse Landscapes in Southern Brazil. *Land* 9:176. doi: 10.3390/land9060176.

Lamanda, N. 2005. Caractérisation et Évaluation Agroécologique de Systèmes de Culture Agroforestiers: Une Démarche Appliquée Aux Systèmes de Culture à Base de Cocotiers (Cocos Nucifera L.) Sur l'île de Malo, Vanuatu. *Institut National Agronomique Paris-Grignon. Discipline: Science Agronomique.*

Lamb, D., P. D. Erskine, and J. A. Parrotta. 2005. Restoration of Degraded Tropical Forest Landscapes. *Science* 310:1628–1632. doi: 10.1126/science.1111773.





Landis, D. A. 2017. Designing Agricultural Landscapes for Biodiversity-Based Ecosystem Services. *Basic and Applied Ecology* 18:1–12. doi: 10.1016/j.baae.2016.07.005.

Lang, M. 2019, May 29. *Caractérisation de l'hétérogénéité Spatiale de Milieux Naturels à Partir d'imagerie Optique Très Haute Résolution Spatiale : Cas d'application Aux Milieux Méditerranéens de Garrigue*. These de doctorat, Paris, AgroParisTech.

Lasco, R. D., R. J. P. Delfino, and M. L. O. Espaldon. 2014. Agroforestry Systems: Helping Smallholders Adapt to Climate Risks While Mitigating Climate Change. *WIREs Climate Change* 5:825–833. doi: 10.1002/wcc.301.

Lavauden, L. 1934. Histoire de La Législation et de l'administration Forestière à Madagascar. *Revue des Eaux et Forêts* 72:949–960.

Le Bourdiec, F. 1974. *Hommes et paysages du riz à Madagascar : étude de géographie humaine*. Antanarive, Madagascar.

Leclerc, C., and G. Coppens d'Eeckenbrugge. 2012. Social Organization of Crop Genetic Diversity. The G × E × S Interaction Model. *Diversity* 4:1–32. doi: 10.3390/d4010001.

Ledreux, A. 1928. Le Giroflier Dans Les Régions de Fénérive, Soanierana et Sainte-Marie. *Bulletin de Madagascar* 1.

Ledreux, A. 1932. Le Giroflier à Sainte-Marie et Madagascar. *Bulletin mensuel de l'Institut national d'Agronomie coloniale* 175:22.

Lin, B. B. 2007. Agroforestry Management as an Adaptive Strategy against Potential Microclimate Extremes in Coffee Agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology* 144:85–94. doi: 10.1016/j.agrformet.2006.12.009.

Lin, B. B. 2011. Resilience in Agriculture through Crop Diversification: Adaptive Management for Environmental Change. *BioScience* 61:183–193. doi: 10.1525/bio.2011.61.3.4.

Linot, M., A. Vogel, M. Rakotondrabe, and S. Aubert. 2019. La gestion communautaire sous le prisme des communs dans la réserve de biosphère de Mananara Nord à Madagascar : le cas de Sahasoa. :10.

Llopis, J., J. Chastonay, F. Birrer, R. Bär, R. Andriatsitohaina, P. Messerli, A. Heinimann, and J. Zaehringer. 2021. Year-to-Year Ecosystem Services Supply in Conservation Contexts in North-Eastern Madagascar: Trade-Offs between Global Demands and Local Needs. *Ecosystem Services* 48:101249. doi: 10.1016/j.ecoser.2021.101249.

Llopis, J. C., C. L. Diebold, F. Schneider, P. C. Harimalala, L. Patrick, P. Messerli, and J. G. Zaehringer. 2020. Capabilities Under Telecoupling: Human Well-Being Between Cash Crops and Protected Areas in North-Eastern Madagascar. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 3:126. doi: 10.3389/fsufs.2019.00126.

Lo, M., and Y. Laumonier. 2019. Beyond the Stand: Reviewing Landscape Fragmentation Dynamics on Biodiversity and Ecosystem Services in Southeast Asia. conference_item, CIRAD. https://agritrop.cirad.fr/592926/. Accessed February 24, 2022.

Loreau, M., S. Naeem, P. Inchausti, J. Bengtsson, J. P. Grime, A. Hector, D. U. Hooper, M. A. Huston, D. Raffaelli, B. Schmid, D. Tilman, and D. A. Wardle. 2001. Biodiversity and Ecosystem Functioning: Current Knowledge and Future Challenges. *Science* 294:804–808. doi: 10.1126/science.1064088.

Lusher, D., J. Koskinen, and G. Robins. 2013. *Exponential Random Graph Models for Social Networks: Theory, Methods, and Applications*. Cambridge University Press.

Maginnis, S., and W. Jackson. 2005. *Restoring Forest Landscapes: Forest Landscape Restoration Aims to Re-Establish Ecological Integrity and Human Well-Being in the Degraded Forest Landscapes*. p. 6. IUCN, Switzerland.

Maistre, J. 1955. Le Giroflier à Madagascar et Zanzibar. :413–448.

Malard, J. J., H. Melgar-Quiñonez, P. Pineda, J. Gálvez, and J. F. Adamowski. 2014. Agricultural and Social Resiliency of Small-Scale Agriculture to Economic and Climatic Shocks: A Comparison of Subsistence versus Market-Based Agricultural Approaches in Rural Guatemala. 2014:GC21F-05.

Mansourian, S., J. Parrotta, P. Balaji, I. Bellwood-Howard, S. Bhasme, R. P. Bixler, A. K. Boedhihartono, R. Carmenta, T. Jedd, W. de Jong, F. K. Lake, A. Latawiec, M. Lippe, N. D. Rai, J. Sayer, K. Van Dexter, B. Vira, I. Visseren-Hamakers, C. Wyborn, and A. Yang. 2020. Putting the Pieces Together: Integration for Forest Landscape Restoration Implementation. *Land Degradation & Development* 31:419–429. doi: 10.1002/ldr.3448.

Marcon, E. 2015, September 15. *Mesures de la Biodiversité*. lecture, AgroParisTech.

Marie, C. N., N. Sibelet, M. Dulcire, M. Rafalimaro, P. Danthu, and S. M. Carrière. 2009. Taking into Account Local Practices and Indigenous Knowledge in an Emergency Conservation Context in Madagascar. *Biodiversity and Conservation* 18:2759–2777. doi: 10.1007/s10531-009-9672-9.

Mariel, J., S. M. Carrière, E. Penot, P. Danthu, V. Rafidison, and V. Labeyrie. 2021a. Exploring Farmers' Agrobiodiversity Management Practices and Knowledge in Clove Agroforests of Madagascar. *People and Nature*:pan3.10238. doi: 10.1002/pan3.10238.

Mariel, J., É. Penot, and P. Danthu. 2021b. Les systèmes agroforestiers dans les stratégies paysannes de résilience à Madagascar. *Économie rurale. Agricultures, alimentations, territoires*:43–63. doi: 10.4000/economierurale.9104.

Mariel, J., V. Freycon, J. Randriamalala, V. Rafidison, and V. Labeyrie. Accepté. Local Knowledge of the Interactions between Agrobiodiversity and Soil: A Fertile Substrate for Adapting to Soil Changes in Madagascar? *Journal of Ethnobiology*.

Mariel, J., H. Herimandimby, V. Labeyrie, S. M. Carrière, J. Baudry, and C. Lelong. En préparation. Agroforesterie for Land Restoration: Implications for a Degraded Landscape on the East Coast of Madagascar. *Agriculture, Ecosystems & Environment*.

Mariel, J., É. Penot, H. Herimandimby, and P. Danthu. Accepté. From Shifting Rice Cultivation (Tavy) to Agroforestry Systems : A Century of Changing Land Use on the East Coast of Madagascar. *Agroforestry Systems*.

Martin, D., A. Wurz, K. Osen, I. Grass, D. Hölscher, T. Tscharntke, and H. Kreft. 2020. *Shade-Tree Rehabilitation in Vanilla Agroforests Is Yield Neutral and May Translate into Landscape-Scale Canopy Cover Gains*. doi: 10.32942/osf.io/63fc2.

Martin, E. A., L. Ratsimisetra, F. Laloë, and S. M. Carrière. 2009. Conservation Value for Birds of Traditionally Managed Isolated Trees in an Agricultural Landscape of Madagascar. *Biodiversity and Conservation* 18:2719–2742. doi: 10.1007/s10531-009-9671-x.

Martin, E. A., M. Viano, L. Ratsimisetra, F. Laloë, and S. M. Carrière. 2012. Maintenance of Bird Functional Diversity in a Traditional Agroecosystem of Madagascar. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 149:1–9. doi: 10.1016/j.agee.2011.12.005.

Martin, G. 1995. *Ethnobotany-A People and Plants Conservation Manual*, Chapman&Hall. World Wide Fund for Nature, London.

Martin, T. 2016. *Exploitations Familiales Ou Agro-Industrie : Quel Modèle de Développement Pour Le Palmier à Huile Au Cameroun ?* Mémoire Ingénieur RESAD, Supagro Montpellier, Institut des Régions Chaudes, Montpellier.

Martín-López, B., I. Palomo, M. García-Llorente, I. Iniesta-Arandia, A. J. Castro, D. García Del Amo, E. Gómez-Baggethun, and C. Montes. 2017. Delineating Boundaries of Social-Ecological Systems for Landscape Planning: A Comprehensive Spatial Approach. *Land Use Policy* 66:90–104. doi: 10.1016/j.landusepol.2017.04.040.

Matouš, P., Y. Todo, and D. Mojo. 2013. Roles of Extension and Ethno-Religious Networks in Acceptance of Resource-Conserving Agriculture among Ethiopian Farmers. *International Journal of Agricultural Sustainability* 11:301–316. doi: 10.1080/14735903.2012.751701.

Matson, P. A., W. J. Parton, A. G. Power, and M. J. Swift. 1997. Agricultural Intensification and Ecosystem Properties. *Science* 277:504–509. doi: 10.1126/science.277.5325.504.

Mazoyer, M., and L. Roudart. 2017. *Histoire des agricultures du monde. Du néolithique à la crise contemporaine.* Média Diffusion.

Mbow, C., P. Smith, D. Skole, L. Duguma, and M. Bustamante. 2014a. Achieving Mitigation and Adaptation to Climate Change through Sustainable Agroforestry Practices in Africa. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 6:8–14. doi: 10.1016/j.cosust.2013.09.002.

Mbow, C., M. Van Noordwijk, E. Luedeling, H. Neufeldt, P. A. Minang, and G. Kowero. 2014b. Agroforestry Solutions to Address Food Security and Climate Change Challenges in Africa. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 6:61–67. doi: 10.1016/j.cosust.2013.10.014.

McGuire, S., and L. Sperling. 2016. Seed Systems Smallholder Farmers Use. *Food Security* 8:179–195. doi: 10.1007/s12571-015-0528-8.

Méndez, V. E., C. M. Bacon, M. Olson, K. S. Morris, and A. Shattuck. 2010. Agrobiodiversity and Shade Coffee Smallholder Livelihoods: A Review and Synthesis of Ten Years of Research in Central America. *The Professional Geographer* 62:357–376. doi: 10.1080/00330124.2010.483638.

Méndez, V. E., R. Lok, and E. Somarriba. 2001. Interdisciplinary Analysis of Homegardens in Nicaragua: Micro- Zonation, Plant Use and Socioeconomic Importance. *Agroforestry Systems* 51:85–96. doi: 10.1023/A:1010622430223.

Mercer, D. E. 2004. Adoption of Agroforestry Innovations in the Tropics: A Review. *Agroforestry Systems* 61:311–328. doi: 10.1023/B:AGFO.0000029007.85754.70.

Messerli, P. 2003. *Alternatives à La Culture Sur Brûlis.* Faculty of Sciences of the University of Bern, Bern.

Michalscheck, M., J. C. J. Groot, G. Fischer, and P. Tittonell. 2020. Land Use Decisions: By Whom and to Whose Benefit? A Serious Game to Uncover Dynamics in Farm Land Allocation at Household Level in Northern Ghana. *Land Use Policy* 91:104325. doi: 10.1016/j.landusepol.2019.104325.

Michel, I., M. Lobietti, P. Danthu, E. Penot, F. Velonjara, M. Jahiel, and T. Michels. 2021. Agroforestry Innovation by Smallholders Facing Uncertainty: The Case of Clove-Based Cropping Systems in Madagascar. *European Journal of Agronomy* 123:126218. doi: 10.1016/j.eja.2020.126218.





Michel-Guillou, E., and G. Moser. 2006. Commitment of Farmers to Environmental Protection: From Social Pressure to Environmental Conscience. *Journal of Environmental Psychology* 26:227–235. doi: 10.1016/j.jenvp.2006.07.004.

Michels, T., A. Bisson, V. Ralaidovy, H. Rabemananjar, M. Jahiel, and É. Malézieux. 2010. Horticultural Agroforestry Systems in the Humid Tropics: Analysis of Clove Tree-Based Systems in Madagascar. *International Symposium on Tropical Horticulture* 894:161–197.

Michon, G., and H. Foresta. 1999. Agro-Forests: Incorporating a Forest Vision in Agroforestry. In *Agroforestry in Sustainable Agricultural Systems*. Louise E. Buck, James P. Lassoie, and Erick C. M. Fernandes.

Millennium Ecosystem Assessment. 2005. *Ecosystems and Human Well-Being: Wetlands and Water. Synthesis*. World Resources Institute, Washington, Washington DC.

Miller, D. C., P. J. Ordoñez, S. E. Brown, S. Forrest, N. J. Nava, K. Hughes, and K. Baylis. 2020. The Impacts of Agroforestry on Agricultural Productivity, Ecosystem Services, and Human Well-being in Low-and Middle-income Countries: An Evidence and Gap Map. *Campbell Systematic Reviews* 16. doi: 10.1002/cl2.1066.

Milne, G. 1947. A Soil Reconnaissance Journey Through Parts of Tanganyika Territory December 1935 to February 1936. *Journal of Ecology* 35:192–265. doi: 10.2307/2256508.

Miltner, B. C., and O. T. Coomes. 2015. Indigenous Innovation Incorporates Biochar into Swidden-Fallow Agroforestry Systems in Amazonian Peru. *Agroforestry Systems* 89:409–420. doi: 10.1007/s10457-014-9775-5.

Moges, A., and N. M. Holden. 2007. Farmers' Perceptions of Soil Erosion and Soil Fertility Loss in Southern Ethiopia. *Land Degradation & Development* 18:543–554. doi: 10.1002/ldr.795.

Montagnini, F., and R. Metzel. 2017. The Contribution of Agroforestry to Sustainable Development Goal 2: End Hunger, Achieve Food Security and Improved Nutrition, and Promote Sustainable Agriculture. In *Integrating Landscapes: Agroforestry for Biodiversity Conservation and Food Sovereignty*, edited by F. Montagnini, pp. 11–45. Springer International Publishing, Cham. doi: 10.1007/978-3-319-69371-2_2.

Muchane, M. N., G. W. Sileshi, S. Gripenberg, M. Jonsson, L. Pumariño, and E. Barrios. 2020. Agroforestry Boosts Soil Health in the Humid and Sub-Humid Tropics: A Meta-Analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 295:106899. doi: 10.1016/j.agee.2020.106899.

Mulyoutami, E., B. Lusiana, and M. van Noordwijk. 2020. Gendered Migration and Agroforestry in Indonesia: Livelihoods, Labor, Know-How, Networks. *Land* 9:529. doi: 10.3390/land9120529.

Nair, P. K. R. 2011. Agroforestry Systems and Environmental Quality: Introduction. *Journal of Environmental Quality* 40:784–790. doi: 10.2134/jeq2011.0076.

Nair, P. K. R. 1991. State-of-the-Art of Agroforestry Systems. *Forest Ecology and Management* 45:5–29. doi: 10.1016/0378-1127(91)90203-8.

Nair, P. K. R. 1985. Classification of Agroforestry Systems. *Agroforestry Systems* 3:97–128. doi: 10.1007/BF00122638.

Nath, A. J., U. K. Sahoo, K. Giri, G. W. Sileshi, and A. K. Das. 2020. Incentivizing Hill Farmers for Promoting Agroforestry as an Alternative to Shifting Cultivation in Northeast India. In *Agroforestry for Degraded Landscapes: Recent Advances and Emerging Challenges - Vol.1*, edited by J. C. Dagar, S. R. Gupta, and D. Teketay, pp. 425–444. Springer, Singapore. doi: 10.1007/978-981-15-4136-0_14.

Ndlovu, P., O. Mutanga, M. Sibanda, J. Odindi, and I. Rushworth. 2018. Modelling Potential Distribution of Bramble (Rubus Cuneifolius) Using Topographic, Bioclimatic and Remotely Sensed Data in the KwaZulu-Natal Drakensberg, South Africa. *Applied Geography* 99:54–62. doi: 10.1016/j.apgeog.2018.07.025.

Neimark, B., S. Osterhoudt, L. Blum, and T. Healy. 2019. Mob Justice and 'The Civilized Commodity.' *The Journal of Peasant Studies*:1–20. doi: 10.1080/03066150.2019.1680543.

Niemeijer, D., and V. Mazzucato. 2003. Moving beyond Indigenous Soil Taxonomies: Local Theories of Soils for Sustainable Development. *Geoderma* 111:403–424. doi: 10.1016/S0016-7061(02)00274-4.

Nordhagen, S., U. Pascual, and A. G. Drucker. 2017. Feeding the Household, Growing the Business, or Just Showing Off? Farmers' Motivations for Crop Diversity Choices in Papua New Guinea. *Ecological Economics* 137:99–109. doi: 10.1016/j.ecolecon.2017.02.025.

Notaro, M., C. Collado, J. K. Depas, D. Dumovil, A. J. Denis, O. Deheuvels, P. Tixier, and C. Gary. 2021. The Spatial Distribution and Height of Associated Crops Influence Cocoa Tree Productivity in Complex Agroforestry Systems. *Agronomy for Sustainable Development* 41:60. doi: 10.1007/s13593-021-00716-w.

Notaro, M., C. Gary, and O. Deheuvels. 2020. Plant Diversity and Density in Cocoa-Based Agroforestry Systems: How Farmers' Income Is Affected in the Dominican Republic. *Agroforestry Systems* 94:1071–1084. doi: 10.1007/s10457-019-00472-7.

Ochoa. M, W. S., F. H. Härtl, C. Paul, and T. Knoke. 2019. Cropping Systems Are Homogenized by Off-Farm Income – Empirical Evidence from Small-Scale Farming Systems in Dry Forests of Southern Ecuador. *Land Use Policy* 82:204–219. doi: 10.1016/j.landusepol.2018.11.025.

Olivier de Sardan, J.-P. 1998. Émique. *Homme* 38:151–166. doi: 10.3406/hom.1998.370510.

Osen, K., M. R. Soazafy, D. A. Martin, A. Wurz, A. März, H. L. T. Ranarijaona, and D. Hölscher. 2021. Land-Use History Determines Stand Structure and Tree Diversity in Vanilla Agroforests of Northeastern Madagascar. *Applied Vegetation Science* 24:e12563. doi: https://doi.org/10.1111/avsc.12563.

Özesmi, U., and S. L. Özesmi. 2004. Ecological Models Based on People's Knowledge: A Multi-Step Fuzzy Cognitive Mapping Approach. *Ecological Modelling* 176:43–64. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2003.10.027.

Padonou, E., A. Fandohan, Y. Bachmann, and B. Sinsin. 2014. How Farmers Perceive and Cope with Bowalization: A Case Study from West Africa. *Land Use Policy* 36:461–467. doi: 10.1016/j.landusepol.2013.09.024.

Parrotta, J. A. 2002. Restoration and Management of Degraded Tropical Forest Landscapes. In *Modern Trends in Applied Terrestrial Ecology*, edited by R. S. Ambasht and N. K. Ambasht, pp. 135–148. Springer US, Boston, MA. doi: 10.1007/978-1-4615-0223-4_7.

Pauli, N., E. Barrios, A. J. Conacher, and T. Oberthü. 2012. Farmer Knowledge of the Relationships among Soil Macrofauna, Soil Quality and Tree Species in a Smallholder Agroforestry System of Western Honduras. *Geoderma* 189–190:186–198. doi: 10.1016/j.geoderma.2012.05.027.

Pautasso, M., G. Aistara, A. Barnaud, S. Caillon, P. Clouvel, O. T. Coomes, M. Delêtre, E. Demeulenaere, P. De Santis, T. Döring, L. Eloy, L. Emperaire, E. Garine, I. Goldringer, D. Jarvis, H. I. Joly, C. Leclerc, S. Louafi, P. Martin, F. Massol, S. McGuire, D. McKey, C. Padoch, C. Soler, M. Thomas, and S. Tramontini. 2013. Seed Exchange Networks for Agrobiodiversity Conservation. A Review. *Agronomy for Sustainable Development* 33:151–175. doi: 10.1007/s13593-012-0089-6.

Pedelahore, P. 2014. Systèmes agroforestiers à cacaoyers et transition capitaliste : l'exemple du Centre-Cameroun. *Bois et Forêts des Tropiques*.

Penot, É., and P. Danthu. 2019. Entre « ignorance Politique », Ingérence et Contrôle de l'Etat: Quelles Politiques Publiques Pour La Filière Girofle à Madagascar, Aux Comores et à Zanzibar. *Éthique et économique/Ethics and Economics* 16:20.

Penot, É. 2001. *Stratégies Paysannes et Évolution Des Savoirs: L'hévéaculture Agro-Forestière Indonésienne*. Faculté des Sciences Economiques, Université Montpellier I, Montpellier.

Perfecto, I., M. E. Jiménez-Soto, and J. Vandermeer. 2019. Coffee Landscapes Shaping the Anthropocene: Forced Simplification on a Complex Agroecological Landscape. *Current Anthropology* 60:S236–S250. doi: 10.1086/703413.

Perfecto, I., R. A. Rice, R. Greenberg, and M. E. Van der Voort. 1996. Shade Coffee: A Disappearing Refuge for Biodiversity: Shade Coffee Plantations Can Contain as Much Biodiversity as Forest Habitats. *BioScience* 46:598–608. doi: 10.2307/1312989.

Perrier de la Bâthie, H. 1921. La Végétation Malgache. *Annales du Musee Colonial de Marseille* 3:1–268.

Petit, M. 1965. Ankofa, village Betsimisaraka (Côte orientale de Madagascar). *Les Cahiers d'Outre-Mer* 18:105–122. doi: 10.3406/caoum.1965.2380.

Pichon, M. 2015. Espace vécu, perceptions, cartes mentales : l'émergence d'un intérêt pour les représentations symboliques dans la géographie française (1966-1985). *Bulletin de l'association de géographes français. Géographies* 92:95–110. doi: 10.4000/bagf.502.

Picot, M., R. K. B. Jenkins, O. Ramilijaona, P. A. Racey, and S. M. Carrière. 2007. The Feeding Ecology of Eidolon Dupreanum (Pteropodidae) in Eastern Madagascar. *African Journal of Ecology* 45:645–650. doi: 10.1111/j.1365-2028.2007.00788.x.

Pierron, D., M. Heiske, H. Razafindrazaka, I. Rakoto, N. Rabetokotany, B. Ravololomanga, L. M.-A. Rakotozafy, M. M. Rakotomalala, M. Razafiarivony, B. Rasoarifetra, M. A. Raharijesy, L. Razafindralambo, Ramilisonina, F. Fanony, S. Lejamble, O. Thomas, A. Mohamed Abdallah, C. Rocher, A. Arachiche, L. Tonaso, V. Pereda-loth, S. Schiavinato, N. Brucato, F.-X. Ricaut, P. Kusuma, H. Sudoyo, S. Ni, A. Boland, J.-F. Deleuze, P. Beaujard, P. Grange, S. Adelaar, M. Stoneking, J.-A. Rakotoarisoa, C. Radimilahy, and T. Letellier. 2017. Genomic Landscape of Human Diversity across Madagascar. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114:E6498–E6506. doi: 10.1073/pnas.1704906114.

PNUD. 2020. *Rapport Sur Le Développement Humain 2020: La Prochaine Frontière, Le Développement Humain et l'Anthropocène*. Programme des Nations Unies pour le développement, 1 UN Plaza, New York, NY 10017 États-Unis.

Pollini, J. 2014. Slash-and-Burn Agriculture. doi: 10.1007/978-94-007-0929-4_87.

Pollini, J. 2009. Agroforestry and the Search for Alternatives to Slash-and-Burn Cultivation: From Technological Optimism to a Political Economy of Deforestation. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 133:48–60. doi: 10.1016/j.agee.2009.05.002.

Porcuna-Ferrer, A., V. Fiala, B. Freyer, J. van Etten, R. Vernooy, and L. Probst. 2020. Do Community Seed Banks Contribute to the Social-Ecological Resilience of Communities? A Case-Study from Western Guatemala. *International Journal of Agricultural Sustainability* 18:232–249. doi: 10.1080/14735903.2020.1747199.





Potts, M. D., S. Prince, M. Sankaran, and L. Willemen. 2018. IPBES (2018): Summary for Policymakers of the Assessment Report on Land Degradation and Restoration of the Intergovernmental Science- Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. *IPBES*:44.

Pumariño, L., G. W. Sileshi, S. Gripenberg, R. Kaartinen, E. Barrios, M. N. Muchane, C. Midega, and M. Jonsson. 2015. Effects of Agroforestry on Pest, Disease and Weed Control: A Meta-Analysis. *Basic and Applied Ecology* 16:573–582. doi: 10.1016/j.baae.2015.08.006.

Qualset, C., P. McGuire, and M. Warburton. 1995. In California: 'Agrobiodiversity' Key to Agricultural Productivity. *California Agriculture* 49:45–49.

Quave, C. L., and A. Pieroni. 2015. A Reservoir of Ethnobotanical Knowledge Informs Resilient Food Security and Health Strategies in the Balkans. *Nature Plants* 1:1–6. doi: 10.1038/nplants.2014.21.

Quinlan, M. 2005. Considerations for Collecting Freelist in the Field: Exemples from Ethnobotany. *Field Methods*:219–234.

Qurniati, R., I. G. Febryano, and D. Zulfiani. 2017. How Trust Influence Social Capital to Support Collective Action in Agroforestry Development? *Biodiversitas Journal of Biological Diversity* 18:1201–1206. doi: 10.13057/biodiv/d180344.

R Core Team. 2021. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Rabearimanana, L. 1987. La promotion de la caféiculture sur la côte est de Madagascar dans les années 1950. Résultats économiques et répercussions sur le niveau de vie du petit planteur malgache. *Revue française d'histoire d'outre-mer* 74:55–69. doi: 10.3406/outre.1987.2574.

Rabearimanana, L. 1988. Le Paysan de l'Est de Madagascar : Du Tavy à La Riziculture Irriguée: Une Mutation Tardive. *Omaly sy Anio* 27:75–91.

Rafidison, V. M., B. Rakouth, S. M. Carrière, F. Kjellberg, and Y. Aumeeruddy-Thomas. 2020. Multiple Values of Isolated and Clusters of Ficus Tree Species Protected by Betsileo Farmers in Rural Landscapes in Madagascar: Implications for Biodiversity Conservation. *Biodiversity and Conservation* 29:1027–1058. doi: 10.1007/s10531-019-01924-3.

Raimond, C., M. Bakaira, S. A. Doua, and E. Garine. 2020a. Whose Climate, Whose Changes? Various Views from Rural Northern Cameroon. In *Changing Climate, Changing Worlds: Local Knowledge and the Challenges of Social and Ecological Change*, edited by M. Welch-Devine, A. Sourdril, and B. J. Burke, pp. 99–122. Springer International Publishing, Cham. doi: 10.1007/978-3-030-37312-2_6.

Raimond, C., L. Tewende Ouedraogo, C. Noûs, and E. Garine. 2020b. L'agrobiodiversité sous les tropiques, débats et controverses en marge du concept d'Anthropocène ? *Belgeo. Revue belge de géographie*. doi: 10.4000/belgeo.42927.

Rajbanshi, J., and S. Bhattacharya. 2020. Assessment of Soil Erosion, Sediment Yield and Basin Specific Controlling Factors Using RUSLE-SDR and PLSR Approach in Konar River Basin, India. *Journal of Hydrology* 587:124935. doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.124935.

Rakoto Ramiarantsoa, H., and N. Lemoigne. 2014. « La terre est chair, les roches grossissent » : gérer la vie là où elle se trouve. Pour une ethno-pédologie des savoirs paysans. *ELOHI. Peuples indigènes et environnement*:89–116. doi: 10.4000/elohi.747.

Rakotoarivelo, N., A. Razanatsima, F. Rakotoarivony, L. Rasoaviety, A. V. Ramarosandratana, V. Jeannoda, A. R. Kuhlman, A. Randrianasolo, and R. W. Bussmann. 2014. Ethnobotanical and Economic

Value of Ravenala MadagascariensisSonn. in Eastern Madagascar. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine* 10:57. doi: 10.1186/1746-4269-10-57.

Ramboatiana, N., Z. Rabemananjara, C. Grinand, H. Razakamanarivo, S. Razanaka, A. Albrecht, and T. Razafimbelo. 2018. Perception Paysanne Des Facteurs d'utilisation Des Terres–Cas Des Paysages Des Forêts Humides Du Nord-Est de Madagascar. *Akon'ny Ala* 34:03–12.

Randriamalala, J. R., D. Hervé, P. Letourmy, and S. M. Carrière. 2015. Effects of Slash-and-Burn Practices on Soil Seed Banks in Secondary Forest Successions in Madagascar. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 199:312–319. doi: 10.1016/j.agee.2014.09.010.

Razafimpahanana, B. 1970. Les Fady Ou Tabous à Madagascar-Étude Sociologique et Psychosociologique. In *Annales de l'Université de Madagascar-Série Lettres et Sciences Humaines*. Antanarive, Madagascar.

Razafindrakoto, M., F. Roubaud, and J.-M. Wachsberger. 2018. La Trajectoire de Madagascar Au Prisme de Ses Crises. *D'une crise l'autre*.

Reed, J., J. van Vianen, S. Foli, J. Clendenning, K. Yang, M. MacDonald, G. Petrokofsky, C. Padoch, and T. Sunderland. 2017. Trees for Life: The Ecosystem Service Contribution of Trees to Food Production and Livelihoods in the Tropics. *Forest Policy and Economics* 84:62–71. doi: 10.1016/j.forpol.2017.01.012.

Reed, M. S., A. C. Evely, G. Cundill, I. Fazey, J. Glass, A. Laing, J. Newig, B. Parrish, C. Prell, C. Raymond, and L. C. Stringer. 2010. What Is Social Learning? *Ecology and Society* 15.

Remans, R., S. A. Wood, N. Saha, T. L. Anderman, and R. S. DeFries. 2014. Measuring Nutritional Diversity of National Food Supplies. *Global Food Security* 3:174–182. doi: 10.1016/j.gfs.2014.07.001.

Renard, D., and D. Tilman. 2021. Cultivate Biodiversity to Harvest Food Security and Sustainability. *Current Biology* 31:R1154–R1158. doi: 10.1016/j.cub.2021.06.082.

Resque, A. G. L., E. Perrier, E. Coudel, L. Galvão, J. V. Fontes, R. Carneiro, L. Navegantes, and C. Le Page. 2021. Discussing Ecosystem Services in Management of Agroecosystems : A Role Playing Game in the Eastern Brazilian Amazon. *Agroforestry Systems*. doi: 10.1007/s10457-021-00633-7.

Reyes-García, V., D. García del Amo, P. Benyei, A. B. Junqueira, V. Labeyrie, X. Li, A. Porcuna-Ferrer, A. Schlingmann, R. Soleymani-Fard, and V. Porcher. 2021. *Protocol for the Collection of Cross-Cultural Comparative Data on Local Indicators of Climate Change Impacts*. figshare. doi: 10.6084/m9.figshare.17142284.v2.

Reyes-García, V., J. Broesch, L. Calvet-Mir, N. Fuentes-Peláez, T. W. McDade, S. Parsa, S. Tanner, T. Huanca, W. R. Leonard, and M. R. Martínez-Rodríguez. 2009. Cultural Transmission of Ethnobotanical Knowledge and Skills: An Empirical Analysis from an Amerindian Society. *Evolution and Human Behavior* 30:274–285. doi: 10.1016/j.evolhumbehav.2009.02.001.

Reyes-García, V., N. Martí, T. McDADE, S. Tanner, and V. Vadez. 2007. Concepts and Methods in Studies Measuring Individual Ethnobotanical Knowledge. *Journal of Ethnobiology* 27:182–203. doi: 10.2993/0278-0771(2007)27[182:CAMISM]2.0.CO;2.

Reyes-García, V., V. Vadez, E. Byron, L. Apaza, W. R. Leonard, E. Perez, and D. Wilkie. 2005. Market Economy and the Loss of Folk Knowledge of Plant Uses: Estimates from the Tsimane' of the Bolivian Amazon. *Current Anthropology* 46:651–656. doi: 10.1086/432777.

Reynolds, C., and C. T. Symes. 2013. Grassland Bird Response to Vegetation Structural Heterogeneity and Clearing of Invasive Bramble. *African Zoology* 48:228–239. doi: 10.1080/15627020.2013.11407588.

Ricciardi, V., N. Ramankutty, Z. Mehrabi, L. Jarvis, and B. Chookolingo. 2018. How Much of the World's Food Do Smallholders Produce? *Global Food Security* 17:64–72. doi: 10.1016/j.gfs.2018.05.002.

Rice, R. A. 2008. Agricultural Intensification within Agroforestry: The Case of Coffee and Wood Products. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 128:212–218. doi: 10.1016/j.agee.2008.06.007.

Rice, R. A., and R. Greenberg. 2000. Cacao Cultivation and the Conservation of Biological Diversity. *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 29:167–173. doi: 10.1579/0044-7447-29.3.167.

Rigal, C., P. Vaast, and J. Xu. 2018. Using Farmers' Local Knowledge of Tree Provision of Ecosystem Services to Strengthen the Emergence of Coffee-Agroforestry Landscapes in Southwest China. *PLoS ONE* 13. doi: 10.1371/journal.pone.0204046.

Rimlinger, A., J. Duminil, T. Lemoine, M. L. Avana-Tientcheu, A. Chakocha, A. Gakwavu, M. Franca, M. Tsogo, M. Elias, and S. Carrière. 2021. Shifting Perceptions, Preferences and Practices in the African Fruit Trade: The Case of African Plum (Dacryodes Edulis) in Different Cultural and Urbanization Contexts in Cameroon. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine* 17. doi: 10.1186/s13002-021-00488-3.

Rist, S., and F. Dahdouh-Guebas. 2006. Ethnosciences—A Step towards the Integration of Scientific and Indigenous Forms of Knowledge in the Management of Natural Resources for the Future. *Environment, Development and Sustainability* 8:467–493. doi: 10.1007/s10668-006-9050-7.

Rockenbauch, T., P. Sakdapolrak, and H. Sterly. 2019a. Do Translocal Networks Matter for Agricultural Innovation? A Case Study on Advice Sharing in Small-Scale Farming Communities in Northeast Thailand. *Agriculture and Human Values* 36:685–702. doi: 10.1007/s10460-019-09935-0.

Rockenbauch, T., P. Sakdapolrak, and H. Sterly. 2019b. Beyond the Local – Exploring the Socio-Spatial Patterns of Translocal Network Capital and Its Role in Household Resilience in Northeast Thailand. *Geoforum* 107:154–167. doi: 10.1016/j.geoforum.2019.09.009.

Rockenbauch, T., and P. Sakdapolrak. 2017. Social Networks and the Resilience of Rural Communities in the Global South: A Critical Review and Conceptual Reflections. *Ecology and Society* 22.

Rodrigues, R. C., R. A. Araújo, C. S. Costa, A. J. T. Lima, M. E. Oliveira, J. A. A. C. Jr, F. N. S. Santos, J. S. Araújo, V. M. Santos, and A. S. F. Araújo. 2015. Soil Microbial Biomass in an Agroforestry System of Northeast Brazil. *Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales* 3:41–48. doi: 10.17138/tgft(3)41-48.

Rojas, A. W. 2009. Policultivos de la mente. Enseñanzas del campesinado y de la agroecología para la educación en la sustentabilidad. *Agroecología* 4:29–38.

Romney, A. K., S. C. Weller, and W. H. Batchelder. 1986. Culture as Consensus: A Theory of Culture and Informant Accuracy. *American Anthropologist* 88:313–338. doi: 10.1525/aa.1986.88.2.02a00020.

Roose, E., V. Kaboré, and C. Guenat. 1993. Le zaï : fonctionnement, limites et amélioration d'une pratique traditionnelle africaine de réhabilitation de la végétation et de la productivité des terres dégradées en région soudano-sahélienne (Burkina Faso). *Cahiers ORSTOM.Série Pédologie* 28:159–173.

Roué, M. 2012. Histoire et épistémologie des savoirs locaux et autochtones : De la tradition à la mode. *Revue d'ethnoécologie*. doi: 10.4000/ethnoecologie.813.

Ruf, F. 2014. Cacao et vin de palme : un facteur de résilience innattendu. *Bois & Forêts des Tropiques* 321:33–44.

Ruf, F., and G. Schroth. 2004. Chocolate Forests and Monocultures - an Historical Review of Cocoa Growing and Its Conflicting Role in Tropical Deforestation and Forest Conservation. pp. 107–134.

Ruggieri, F., A. Porcuna-Ferrer, A. Gaudin, N. F. Faye, V. Reyes-García, and V. Labeyrie. 2021. Crop Diversity Management: Sereer Smallholders' Response to Climatic Variability in Senegal. *Journal of Ethnobiology* 41:389–408. doi: 10.2993/0278-0771-41.3.389.

Sahoo, U. K., and P. Rocky. 2015. Species Composition and Plant Diversity as Influenced by Altitude and Size of Homegardens in Mizoram, North-East India. *International Journal of Ecology and Environmental Sciences* 41:195-215–215.

Saint Ville, A. S., G. M. Hickey, U. Locher, and L. E. Phillip. 2016. Exploring the Role of Social Capital in Influencing Knowledge Flows and Innovation in Smallholder Farming Communities in the Caribbean. *Food Security* 8:535–549. doi: 10.1007/s12571-016-0581-y.

Saito, K., B. Linquist, B. Keobualapha, T. Shiraiwa, and T. Horie. 2006. Farmers' Knowledge of Soils in Relation to Cropping Practices: A Case Study of Farmers in Upland Rice Based Slash-and-Burn Systems of Northern Laos. *Geoderma* 136:64–74. doi: 10.1016/j.geoderma.2006.02.003.

Salazar-Díaz, R., and P. Tixier. 2019. Effect of Plant Diversity on Income Generated by Agroforestry Systems in Talamanca, Costa Rica. *Agroforestry Systems* 93:571–580. doi: 10.1007/s10457-017-0151-0.

Salomon, J.-N. 1982. Problèmes de communications sur la côte Est malgache : une réhabilitation du Canal des Pangalanes. *Les Cahiers d'Outre-Mer* 35:63–76. doi: 10.3406/caoum.1982.3009.

Salpeteur, M., H. Patel, J. L. Molina, A. Balbo, X. Rubio-Campillo, V. Reyes-García, and M. Madella. 2016. Comigrants and Friends: Informal Networks and the Transmission of Traditional Ecological Knowledge among Seminomadic Pastoralists of Gujarat, India. *Ecology and Society* 21.

Samberg, L. H., J. S. Gerber, N. Ramankutty, M. Herrero, and P. C. West. 2016. Subnational Distribution of Average Farm Size and Smallholder Contributions to Global Food Production. *Environmental Research Letters* 11:124010. doi: 10.1088/1748-9326/11/12/124010.

Samberg, L. H., C. Shennan, and E. Zavaleta. 2013. Farmer Seed Exchange and Crop Diversity in a Changing Agricultural Landscape in the Southern Highlands of Ethiopia. *Human Ecology* 41:477–485. doi: 10.1007/s10745-013-9579-7.

Santos, P. Z. F., R. Crouzeilles, and J. B. B. Sansevero. 2019. Can Agroforestry Systems Enhance Biodiversity and Ecosystem Service Provision in Agricultural Landscapes? A Meta-Analysis for the Brazilian Atlantic Forest. *Forest Ecology and Management* 433:140–145. doi: 10.1016/j.foreco.2018.10.064.

Sayer, J., T. Sunderland, J. Ghazoul, J.-L. Pfund, D. Sheil, E. Meijaard, M. Venter, A. K. Boedhihartono, M. Day, C. Garcia, and others. 2013. Ten Principles for a Landscape Approach to Reconciling Agriculture, Conservation, and Other Competing Land Uses. *Proceedings of the national academy of sciences* 110:8349–8356.

Saynes-Vásquez, A., H. Vibrans, F. Vergara-Silva, and J. Caballero. 2016. Intracultural Differences in Local Botanical Knowledge and Knowledge Loss among the Mexican Isthmus Zapotecs. *PLOS ONE* 11:e0151693. doi: 10.1371/journal.pone.0151693.

Scales, B. R., and S. J. Marsden. 2008. Biodiversity in Small-Scale Tropical Agroforests: A Review of Species Richness and Abundance Shifts and the Factors Influencing Them. *Environmental Conservation* 35. doi: 10.1017/S0376892908004840.

Scales, I. R. 2014. The Future of Conservation and Development in Madagascar: Time for a New Paradigm? *Madagascar Conservation & Development* 9:5–12. doi: 10.4314/mcd.v9i1.2.

Scheffran, J., E. Marmer, and P. Sow. 2012. Migration as a Contribution to Resilience and Innovation in Climate Adaptation: Social Networks and Co-Development in Northwest Africa. *Applied Geography* 33:119–127. doi: 10.1016/j.apgeog.2011.10.002.

Scholes, R., L. Montanarella, A. Brainich, N. Barger, B. ten Brink, M. Cantele, B. Erasmus, J. Fisher, T. Gardner, T. G. Holland, F. Kohler, J. S. Kotiaho, G. V. Maltitz, G. Nangendo, R. Pandit, J. Parrotta,

Schroth, G., and C. A. Harvey. 2007. Biodiversity Conservation in Cocoa Production Landscapes: An Overview. *Biodiversity and Conservation* 16:2237–2244. doi: 10.1007/s10531-007-9195-1.

Schroth, G., U. Krauss, L. Gasparotto, J. A. Duarte Aguilar, and K. Vohland. 2000. Pests and Diseases in Agroforestry Systems of the Humid Tropics. *Agroforestry Systems* 50:199–241. doi: 10.1023/A:1006468103914.

Schroth, G., and J. A. McNeely. 2011. Biodiversity Conservation, Ecosystem Services and Livelihoods in Tropical Landscapes: Towards a Common Agenda. *Environmental Management* 48:229–236. doi: 10.1007/s00267-011-9708-2.

Schroth, G., and F. Ruf. 2014. Farmer Strategies for Tree Crop Diversification in the Humid Tropics. A Review. *Agronomy for Sustainable Development* 34:139–154. doi: 10.1007/s13593-013-0175-4.

Shannon, C. E. 1948. A Note on the Concept of Entropy. *Bell System Tech. J* 27:379–423.

Sharma, G., R. Sharma, and E. Sharma. 2009. Traditional Knowledge Systems in Large Cardamom Farming: Biophysical and Management Diversity in Indian Mountainous Regions. *IJTK Vol.8(1) [January 2009]*.

Sharma, R., E. Sharma, and A. N. Purohit. 1995. Dry Matter Production and Nutrient Cycling in Agroforestry Systems of Mandarin Grown in Association with Albizia and Mixed Tree Species. *Agroforestry Systems* 29:165–179. doi: 10.1007/BF00704884.

Shennan-Farpón, Y., M. Mills, A. Souza, and K. Homewood. 2022. The Role of Agroforestry in Restoring Brazil's Atlantic Forest: Opportunities and Challenges for Smallholder Farmers. *People and Nature* n/a. doi: 10.1002/pan3.10297.

Sileshi, G. W., P. L. Mafongoya, and A. J. Nath. 2020. Agroforestry Systems for Improving Nutrient Recycling and Soil Fertility on Degraded Lands. In *Agroforestry for Degraded Landscapes: Recent Advances and Emerging Challenges - Vol.1*, edited by J. C. Dagar, S. R. Gupta, and D. Teketay, pp. 225–253. Springer, Singapore. doi: 10.1007/978-981-15-4136-0_8.

Sillitoe, P. 2006. Knowing the Land: Soil and Land Resource Evaluation and Indigenous Knowledge. *Soil Use and Management* 14:188–193. doi: 10.1111/j.1475-2743.1998.tb00148.x.

Smith Dumont, E., A. Gassner, G. Agaba, R. Nansamba, and F. Sinclair. 2019. The Utility of Farmer Ranking of Tree Attributes for Selecting Companion Trees in Coffee Production Systems. *Agroforestry Systems* 93:1469–1483. doi: 10.1007/s10457-018-0257-z.

Sterk, M., I. A. van de Leemput, and E. T. Peeters. 2017. How to Conceptualize and Operationalize Resilience in Socio-Ecological Systems? *Current Opinion in Environmental Sustainability* 28:108–113. doi: 10.1016/j.cosust.2017.09.003.

Sterling, E. J., C. Filardi, A. Toomey, A. Sigouin, E. Betley, N. Gazit, J. Newell, S. Albert, D. Alvira, N. Bergamini, M. Blair, D. Boseto, K. Burrows, N. Bynum, S. Caillon, J. E. Caselle, J. Claudet, G. Cullman, R. Dacks, P. B. Eyzaguirre, S. Gray, J. Herrera, P. Kenilorea, K. Kinney, N. Kurashima, S. Macey, C. Malone, S. Mauli, J. McCarter, H. McMillen, P. Pascua, P. Pikacha, A. L. Porzecanski, P. de Robert, M. Salpeteur, M. Sirikolo, M. H. Stege, K. Stege, T. Ticktin, R. Vave, A. Wali, P. West, K. B.

Winter, and S. D. Jupiter. 2017. Biocultural Approaches to Well-Being and Sustainability Indicators across Scales. *Nature Ecology & Evolution* 1:1798–1806. doi: 10.1038/s41559-017-0349-6.

Sterly, H., and P. Sakdapolrak. 2016. TransRe: Building Resilience to Climate Change through Migration and Translocality.

Stomph, D. 2017. *Smallholder Oil Palm: Space for Diversification ?* MSc Thesis Wageningen University, Wageningen.

Stroesser, L., E. Penot, I. Michel, U. Tongkaemkaew, and B. Chambon. 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* :117–145.

Styger, E., H. M. Rakotondramasy, M. J. Pfeffer, E. C. M. Fernandes, and D. M. Bates. 2007. Influence of Slash-and-Burn Farming Practices on Fallow Succession and Land Degradation in the Rainforest Region of Madagascar. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 119:257–269. doi: 10.1016/j.agee.2006.07.012.

Szott, L. T., and D. C. L. Kass. 1993. Fertilizers in Agroforestry Systems. *Agroforestry Systems* 23:157–176. doi: 10.1007/BF00704913.

Tadross, M., L. Randriamarolaza, Z. Rabefitia, Z. Yip, and M. Tadross. 2008. Climate Change in Madagascar, Recent Past and Future. *Meteo Malgasy*.

Tassin, J., R. Bellefontaine, E. Roger, and C. A. Kull. 2009. Evaluation préliminaire des risques d'invasion par les essences forestières introduites à Madagascar. *Bois & Forêts des Tropiques* 299:27–36.

Taylor, P. 1984. "Covert Categories" Reconsidered: Identifying Unlabeled Classes in Tobelo Folk Biological Classification. *Journal of Ethnobiology* 4:103–120.

Tengö, M., E. S. Brondizio, T. Elmqvist, P. Malmer, and M. Spierenburg. 2014. Connecting Diverse Knowledge Systems for Enhanced Ecosystem Governance: The Multiple Evidence Base Approach. *AMBIO* 43:579–591. doi: 10.1007/s13280-014-0501-3.

Thapa, B., F. L. Sinclair, and D. H. Walker. 1995. Incorporation of Indigenous Knowledge and Perspectives in Agroforestry Development. *Agroforestry Systems* 30:249–261. doi: 10.1007/BF00708924.

Thébault, E. 1960. Le Code Des 305 Articles. Institut des Hautes Etudes de Tananarive.

Thirion, M.-C. (ed), P.-M. (ed ) Bosc, J.-F. Bélières, P. Bonnal, P.-M. Bosc, B. Losch, J. Marzin, and J.-M. Sourisseau. 2014. *Les agricultures familiales du monde : définitions, contributions et politiques publiques.* AFD.

Thomas, M., and S. Caillon. 2016. Effects of Farmer Social Status and Plant Biocultural Value on Seed Circulation Networks in Vanuatu. *Ecology and Society* 21.

Thomas, M., J. C. Dawson, I. Goldringer, and C. Bonneuil. 2011. Seed Exchanges, a Key to Analyze Crop Diversity Dynamics in Farmer-Led on-Farm Conservation. *Genetic Resources and Crop Evolution* 58:321–338. doi: 10.1007/s10722-011-9662-0.

Thomas, M., N. Verzelen, P. Barbillon, O. T. Coomes, S. Caillon, D. McKey, M. Elias, E. Garine, C. Raimond, E. Dounias, D. Jarvis, J. Wencélius, C. Leclerc, V. Labeyrie, P. H. Cuong, N. T. N. Hue, B. Sthapit, R. B. Rana, A. Barnaud, C. Violon, L. M. A. Reyes, L. L. Moreno, P. De Santis, and F. Massol. 2015. Chapter Six - A Network-Based Method to Detect Patterns of Local Crop Biodiversity:

Validation at the Species and Infra-Species Levels. In *Advances in Ecological Research*, edited by G. Woodward and D. A. Bohan, pp. 259–320. Academic Press. doi: 10.1016/bs.aecr.2015.10.002.

Thrupp, L. A. 2000. Linking Agricultural Biodiversity and Food Security: The Valuable Role of Agrobiodiversity for Sustainable Agriculture. *International Affairs* 76:265–281. doi: 10.1111/1468-2346.00133.

Tilghman, L. M. 2019. *Matoy Jirofo, Masaka Lavany*: Rural–Urban Migrants' Livelihood Strategies through the Lens of the Clove Commodity Cycle in Madagascar. *Economic Anthropology* 6:48–60. doi: 10.1002/sea2.12130.

Tomich, T. P., S. Brodt, H. Ferris, R. Galt, W. R. Horwath, E. Kebreab, J. H. J. Leveau, D. Liptzin, M. Lubell, P. Merel, R. Michelmore, T. Rosenstock, K. Scow, J. Six, N. Williams, and L. Yang. 2011. Agroecology: A Review from a Global-Change Perspective. *Annual Review of Environment and Resources* 36:193–222. doi: 10.1146/annurev-environ-012110-121302.

Torquebiau, E. F. 2000. A Renewed Perspective on Agroforestry Concepts and Classification. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences-Series III-Sciences de la Vie* 323:1009–1017.

Tourneur, M. 1947. Épices et Aromates. In *Madagascar et Réunion*, pp. 310–321. M. de Coppet, France.

Tscharntke, T., Y. Clough, S. A. Bhagwat, D. Buchori, H. Faust, D. Hertel, D. Hölscher, J. Juhrbandt, M. Kessler, I. Perfecto, C. Scherber, G. Schroth, E. Veldkamp, and T. C. Wanger. 2011. Multifunctional Shade-Tree Management in Tropical Agroforestry Landscapes – a Review. *Journal of Applied Ecology*:619–629. doi: 10.1111/j.1365-2664.2010.01939.x@10.1111/(ISSN)1365-2664.FAGC.

Tscharntke, T., Y. Clough, T. C. Wanger, L. Jackson, I. Motzke, I. Perfecto, J. Vandermeer, and A. Whitbread. 2012. Global Food Security, Biodiversity Conservation and the Future of Agricultural Intensification. *Biological Conservation* 151:53–59. doi: 10.1016/j.biocon.2012.01.068.

Tucker, C. J. 1979. Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. *Remote Sensing of Environment* 8:127–150. doi: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.

Turner, M. G., and R. H. Gardner. 2015. Introduction to Landscape Ecology and Scale. In *Landscape Ecology in Theory and Practice: Pattern and Process*, edited by M. G. Turner and R. H. Gardner, pp. 1–32. Springer, New York, NY. doi: 10.1007/978-1-4939-2794-4_1.

U.N.C.C.D. 2019. *Land in Numbers 2019 - Risks and Opportunities*. United Nations Convention to Combat Desertification, Germany, Bonn.

UNESCO. 2017. *Knowing Our Lands and Resources: Indigenous and Local Knowledge of Biodiversity and Ecosystem Services in Africa*, Roué M, Césard N, Yao A, Constant Y, Oteng-Yeboah A. UNESCO Publishing, Paris, France.

Vaast, P., and E. Somarriba. 2014. Trade-Offs between Crop Intensification and Ecosystem Services: The Role of Agroforestry in Cocoa Cultivation. *Agroforestry Systems* 88:947–956. doi: 10.1007/s10457-014-9762-x.

Valencia, V., P. West, E. J. Sterling, L. García-Barrios, and S. Naeem. 2015. The Use of Farmers' Knowledge in Coffee Agroforestry Management: Implications for the Conservation of Tree Biodiversity. *Ecosphere* 6:art122. doi: 10.1890/ES14-00428.1.

Valente, T. 2005. Network Models and Methods for Studying the Diffusion of Innovations. *Models and Methods in Social Network Analysis*:98–116. doi: 10.1017/CBO9780511811395.006.

Van Eetvelde, V., and M. Antrop. 2009. A Stepwise Multi-Scaled Landscape Typology and Characterisation for Trans-Regional Integration, Applied on the Federal State of Belgium. *Landscape and Urban Planning* 91:160–170. doi: 10.1016/j.landurbplan.2008.12.008.

Vancutsem, C., F. Achard, J.-F. Pekel, G. Vieilledent, S. Carboni, D. Simonetti, J. Gallego, L. E. O. C. Aragão, and R. Nasi. 2021. Long-Term (1990–2019) Monitoring of Forest Cover Changes in the Humid Tropics. *Science Advances*. doi: 10.1126/sciadv.abe1603.

Vandermeer, J., D. Lawrence, A. Symstad, and S. Hobbie. 2002. *Effect of Biodiversity on Ecosystem Functioning in Managed Ecosystems*, Loreau, M., Naeem, S. and Inchausti, P. Oxford University Press, Oxford, UK.

Vandermeer, J., and I. Perfecto. 1995. Breakfast of Biodiversity: The Truth about Rainforest Destruction. Oakland, CA, USA.

Velásquez-Valencia, A., M. A. Bonilla-Gomez, A. Velásquez-Valencia, and M. A. Bonilla-Gomez. 2019. Influence of the Configuration and Heterogeneity of the Agroforestry and Silvopastoral Mosaics on the Bird Community, Andean Amazon of Colombia. *Revista de Biología Tropical* 67:306–320. doi: 10.15517/rbt.v67i1.33250.

Venot, J.-P., C. B. Jensen, E. Delay, and W. Daré. 2022. Mosaic Glimpses: Serious Games, Generous Constraints, and Sustainable Futures in Kandal, Cambodia. *World Development* 151:105779. doi: 10.1016/j.worlddev.2021.105779.

Vergé, X. P. C., C. De Kimpe, and R. L. Desjardins. 2007. Agricultural Production, Greenhouse Gas Emissions and Mitigation Potential. *Agricultural and Forest Meteorology* 142:255–269. doi: 10.1016/j.agrformet.2006.06.011.

Verhaegen, D., H. Randrianjafy, P. Montagne, P. Danthu, R. Rabevohitra, J. Tassin, and J.-M. Bouvet. 2011. Historique de l'introduction du genre Eucalyptus à Madagascar. :17.

Vieilledent, G., O. Gardi, C. Grinand, C. Burren, M. Andriamanjato, C. Camara, C. J. Gardner, L. Glass, A. Rasolohery, H. Rakoto Ratsimba, V. Gond, and J.-R. Rakotoarijaona. 2016. Bioclimatic Envelope Models Predict a Decrease in Tropical Forest Carbon Stocks with Climate Change in Madagascar. *Journal of Ecology* 104:703–715. doi: 10.1111/1365-2745.12548.

Vieilledent, G., C. Grinand, F. A. Rakotomalala, R. Ranaivosoa, J.-R. Rakotoarijaona, T. F. Allnutt, and F. Achard. 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. doi: 10.1016/j.biocon.2018.04.008.

Vieira, D. L. M., K. D. Holl, and F. M. Peneireiro. 2009. Agro-Successional Restoration as a Strategy to Facilitate Tropical Forest Recovery. *Restoration Ecology* 17:451–459. doi: 10.1111/j.1526-100X.2009.00570.x.

Vijay, V., S. L. Pimm, C. N. Jenkins, and S. J. Smith. 2016. The Impacts of Oil Palm on Recent Deforestation and Biodiversity Loss. *PLOS ONE* 11:e0159668. doi: 10.1371/journal.pone.0159668.

Violon, C., M. Thomas, and E. Garine. 2016. Good Year, Bad Year: Changing Strategies, Changing Networks? A Two-Year Study on Seed Acquisition in Northern Cameroon. *Ecology and Society* 21.

Volper, S. 2011. Une Histoire Des Plantes Coloniales : Du Cacao à La Vanille. *Une histoire des plantes coloniales*:1–144.

Vuillot, C., N. Coron, F. Calatayud, C. Sirami, R. Mathevet, and A. Gibon. 2016. Ways of Farming and Ways of Thinking: Do Farmers' Mental Models of the Landscape Relate to Their Land Management Practices? *Ecology and Society* 21.

Waeber, P. O., A. De Grave, L. Wilme, and C. Garcia. 2019. Play, Learn, Explore: Grasping Complexity through Gaming and Photography. *Madagascar Conservation & Development* 0. doi: 10.4314/mcd.wetlands.1.

Waha, K., M. T. van Wijk, S. Fritz, L. See, P. K. Thornton, J. Wichern, and M. Herrero. 2018. Agricultural Diversification as an Important Strategy for Achieving Food Security in Africa. *Global Change Biology* 24:3390–3400. doi: 10.1111/gcb.14158.

Warren-Thomas, E., L. Nelson, W. Juthong, S. Bumrungsri, O. Brattström, L. Stroesser, B. Chambon, É. Penot, U. Tongkaemkaew, D. P. Edwards, and P. M. Dolman. 2020. Rubber Agroforestry in Thailand Provides Some Biodiversity Benefits without Reducing Yields. *Journal of Applied Ecology* 57:17–30. doi: 10.1111/1365-2664.13530.

Warriner, G. K., and T. M. Moul. 1992. Kinship and Personal Communication Network Influences on the Adoption of Agriculture Conservation Technology. *Journal of Rural Studies* 8:279–291. doi: 10.1016/0743-0167(92)90005-Q.

Webber, A. D., J. S. Solofondranohatra, S. Razafindramoana, D. Fernández, C. A. Parker, M. Steer, M. Abrahams, and J. Allainguillaume. 2020. Lemurs in Cacao: Presence and Abundance within the Shade Plantations of Northern Madagascar. *Folia Primatologica* 91:96–107. doi: 10.1159/000501987.

Weibull, A.-C., Ö. Östman, and Å. Granqvist. 2003. Species Richness in Agroecosystems: The Effect of Landscape, Habitat and Farm Management. *Biodiversity & Conservation* 12:1335–1355. doi: 10.1023/A:1023617117780.

Wencélius, J., M. Thomas, P. Barbillon, and E. Garine. 2016. Interhousehold Variability and Its Effects on Seed Circulation Networks: A Case Study from Northern Cameroon. *Ecology and Society* 21. doi: 10.5751/ES-08208-210144.

Wencélius, J., and É. Garine. 2014. Dans les sillons de l'alliance. Ethnographie de la circulation des semences de sorgho dans l'Extrême-Nord du Cameroun. *Les Cahiers d'Outre-Mer. Revue de géographie de Bordeaux* 67:93–116. doi: 10.4000/com.7082.

West, P. C., H. K. Gibbs, C. Monfreda, J. Wagner, C. C. Barford, S. R. Carpenter, and J. A. Foley. 2010. Trading Carbon for Food: Global Comparison of Carbon Stocks vs. Crop Yields on Agricultural Land. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107:19645–19648. doi: 10.1073/pnas.1011078107.

Wossen, T., T. Berger, T. Mequaninte, and B. Alamirew. 2013. Social Network Effects on the Adoption of Sustainable Natural Resource Management Practices in Ethiopia. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology* 20:477–483. doi: 10.1080/13504509.2013.856048.

Zimmerer, K. S. 2003. Geographies of Seed Networks for Food Plants (Potato, Ulluco) and Approaches to Agrobiodiversity Conservation in the Andean Countries. *Society & Natural Resources* 16:583–601. doi: 10.1080/08941920309185.

Zimmermann, M. 1899. La Forêt à Madagascar. *Annales de Géographie* 8:74–82.

Zomer, R. J., Trabucco A, R. Coe, F. Place, M. van Noordwijk, and J. C. Xu. 2014. *Trees on Farms: An Update and Reanalysis of Agroforestry's Global Extent and Socio-Ecological Characteristics.* World Agroforestry Centre (ICRAF). doi: 10.5716/WP14064.PDF.

# Annexes

### ♦Annexes citées

Appendix 1 : Flow shart that details the successively performed levels of processing for the mapping of the land uses and land covers.....2544

Appendix 2: Number of patches of each land-use according to the class of size lower than 4 ha. DA: Diversified Agroforests. Tsp.P: Timber species Plantations. C.M: Clove monocrops. P: the two types Parks (diversified and low-diversified). W.F: the two types of Woody Fallows (diversified and low-diversified). S.F: the two types of Shrubby Fallow (Bramble and diversified). Ac.P.Sv: Annual crops, Pasture, Short vegetation. P.F.F: Paddy Rice Field. .....2555

Appendix 3: List of species cited by farmers of the sampling. For each species, it is given their common English name (when it exists), their local name, their scientific name (Genus species), their scientific family, and its frequency within the sample of 17 *tsabo* studied.....2555

Appendix 4: Classification of plant species cited by farmers within their clove-based tsabo according to their local functions and botanical category. .....2566

Appendix 5: Occurrence of 14 frequent plant species within *tsabo* with respect to the two variables of spatial organization used for coding and analyzing the participatory maps of *tsabo*: the position of the species according to the topographical gradient (top, center, bottom) and the way in which each species was spatially distributed compared to the other species over the total area of *tsabo* (random, edge, aggregated). .....2577

Appendix 6: Trois exemples de carte participative de tsabo.....2577

Appendix 7: Occurrence des différentes contribution des espèces de *tsabo* (Díaz et al. 2018) reposant sur la classification des usages et des fonctions de l'agrobiodiversité définie par les paysan.ne.s du village de Vohibary. NCP : Natural Contributions to People. ..... 25959

Appendix 8: Noms et descriptions de différentes variétés de bananiers citées par les paysan.ne.s lors des enquêtes conduites pour l'étude du réseau de circulation du bananier.....2600

Appendix 9: Carte d'interactions des espèces positives et négatives du vanillier.....2611

Appendix 10: Répartition spatiale des différents types de micro-zones (cf. chapitre 5) le long de la toposéquence d'une tanety. Le taux d'occupation (occupancy rate) de chaque zone de la toposéquence (1, 2, 3, 4, 5) par chaque type de micro-zone a été calculé sur la base de la fréqeunce des micro-zones présentes sur chaque zone : par exemple, dans le cas du type "mixed age clove 1", moins de 10% des micro-zones de ce type se trouvent dans la zone 1 de la toposéquence.....2611

Appendix 11: Règles du jeu AgroTsabo. .....2622

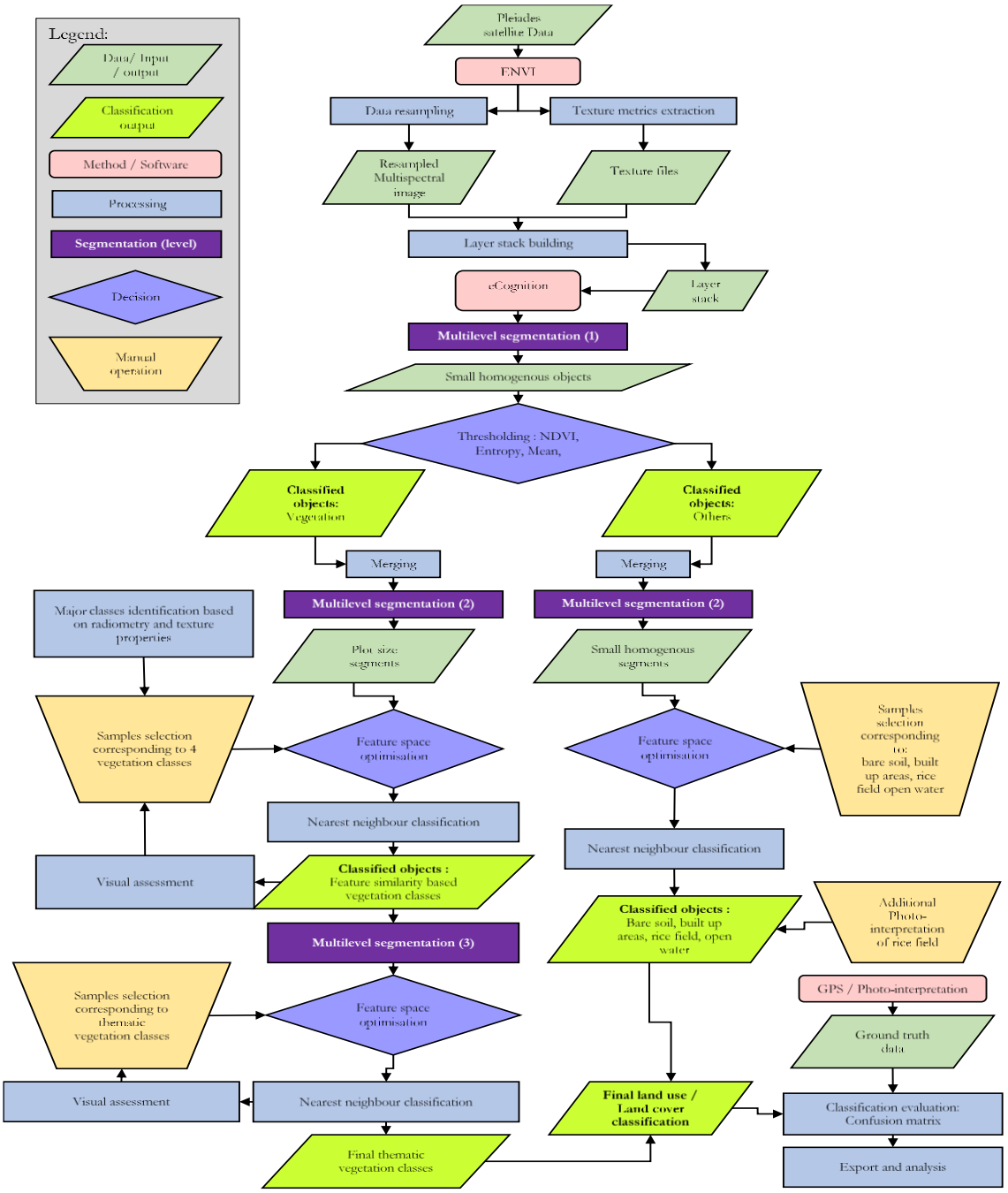
Appendix 12: Abstract de la présentation orale réalisée lors du 4th World Congress on Agrofrestry, 20-22 mai 2019.....2711

Appendix 13: Abstract de la présentation orale qui sera réalisée lors du 5th World Congress on Agrofrestry, 17-20 juillet 2022. .....2722

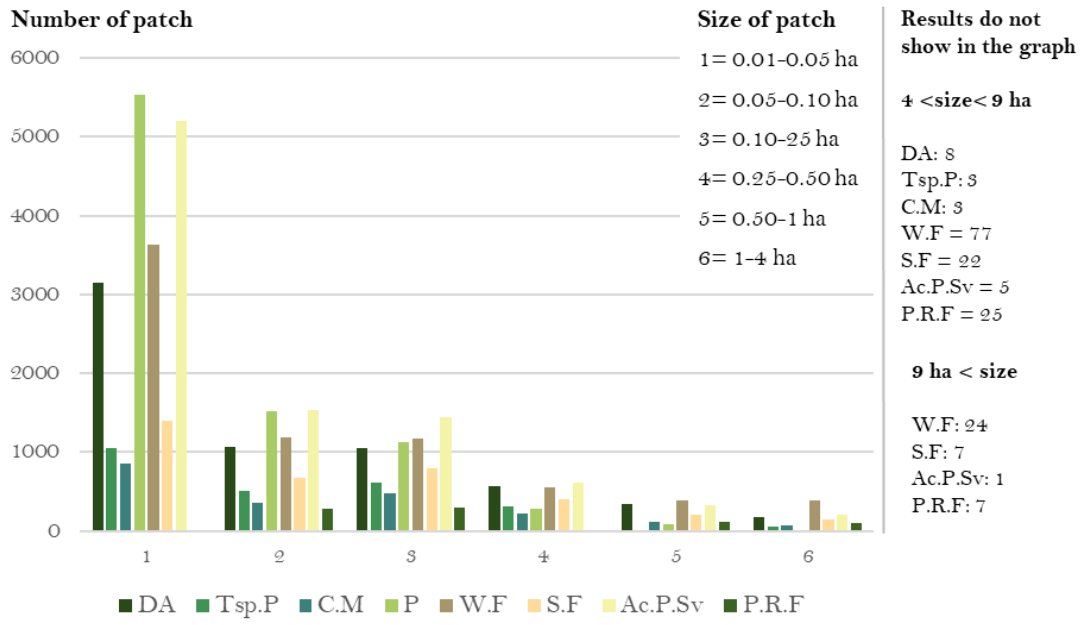
Appendix 14: Poster présenté par Hasina Herimandimby lors du colloque LANDSCAPE 2021, 20-22 septembre (en visio).....2733

Appendix 15: Poster présenté lors du colloque Rencontres d'Écologie des Paysages, 11-13 octobre 2022, Rennes.....2744

*Appendix 1 : Flow shart that details the successively performed levels of processing for the mapping of the land uses and land covers.*



*Appendix 2: Number of patches of each land-use according to the class of size lower than 4 ha. DA: Diversified Agroforests. Tsp.P: Timber species Plantations. C.M: Clove monocrops. P: the two types Parks (diversified and low-diversified). W.F: the two types of Woody Fallows (diversified and low-diversified). S.F: the two types of Shrubby Fallow (Bramble and diversified). Ac.P.Sv: Annual crops, Pasture, Short vegetation. P.F.F: Paddy Rice Field.*

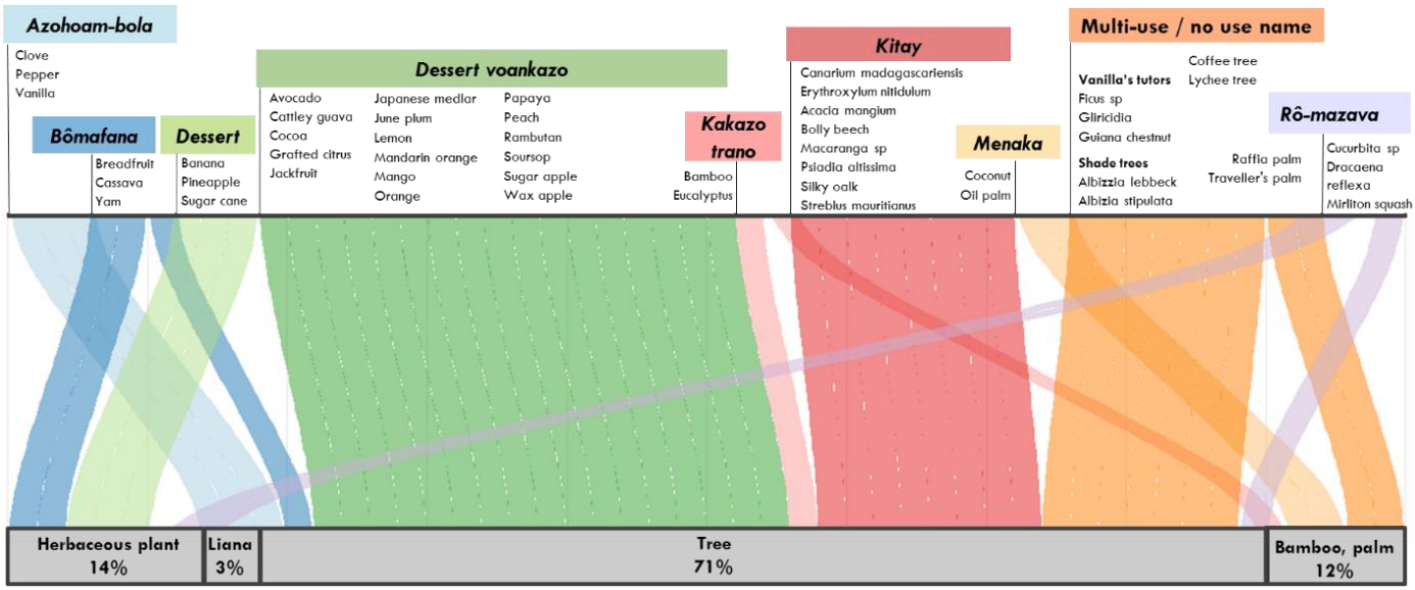



*Appendix 3: List of species cited by farmers of the sampling. For each species, it is given their common English name (when it exists), their local name, their scientific name (Genus species), their scientific family, and its frequency within the sample of 17 tsabo studied.*

| Common name (local name) | Scientific name | Scientific family | Frequency |
|---|---|---|---|
| Clove (jirofo) | *Syzygium aromaticum* | Myrtaceae | 17 |
| Jackfruit (ampaly be) | *Artocarpus heterophyllus* | Moraceae | 15 |
| Lychee (letchi gasy) | *Litchi chinensis* | Sapindaceae | 15 |
| Breadfruit (sahognambo) | *Artocarpus altilis* | Moraceae | 13 |
| Banana (akondro) | *Musa* sp. | Musaceae | 12 |
| Vanilla (vanille) | *Vanilla planifolia* | Orchidaceae | 10 |
| Avocado (gavoka) | *Persea americana* | Lauraceae | 10 |
| Coffee (kafe) | *Coffea canephora* | Rubiaceae | 10 |
| Bamboo (volo be, volo gasy) | *Bambusa* sp. | Poaceae | 8 |
| Silky oak (grevilia) | *Grevillea banksii* | Proteaceae | 8 |
| Traveller's palm (ravenala, ovotra) | *Ravenala madagascariensis* | Strelitziaceae | 8 |
| Orange tree (voangy) | *Citrus sinensis* | Rutaceae | 7 |
| Gliricidia (bonaram bazaha) | *Gliricidia sepium* | Fabaceae | 7 |
| Guiana chestnut (pistasy be) | *Pachira aquatica* | Malvaceae | 7 |
| Bolly beech (ranominty) | *Litsea glutinosa* | Lauraceae | 6 |
| Coconut palm (voanio koko) | *Cocos nucifera* | Arecaceae | 6 |
| Pineapple (manasy) | *Ananas comosus* | Bromeliaceae | 5 |
| Grafted citrus tree (greffe) | *Citrus* sp (hybrid) | Rutaceae | 5 |
| Rambutan (letchim bazaha) | *Nephelium lappaceum* | Sapindaceae | 5 |
| Wax apple (makoba) | *Syzygium samarangense* | Myrtaceae | 5 |
| Oil palm (koko palmier) | *Elaeis guineensis* | Arecaceae | 5 |
| Yam (ovy) | *Dioscorea* sp. | Dioscoreaceae | 4 |
| Sugarcane (fary) | *Saccharum officinarum* | Poaceae | 4 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Mandarin orange (mandarine) | *Citrus reticulata* | Rutaceae | 4 |
| Mango (manga) | *Mangifera indica* | Anacardiaceae | 4 |
| Eucalyptus (kininina) | *Eucalyptus* sp. | Myrtaceae | 4 |
| (albizia) | *Albizia stipulata* | Fabaceae | 4 |
| Pepper (poivre) | *Piper nigrum* | Piperaceae | 3 |
| Cassava (mangahazo) | *Manihot esculenta* | Euphorbiaceae | 3 |
| June plum (sakoangna) | *Spondias dulcis* | Anacardiaceae | 3 |
| Sugar apple (zano) | *Annona squamosa* | Annonaceae | 3 |
| (dingadingana) | *Psiadia altissima* | Asteraceae | 3 |
| (bonara) | *Albizzia lebbeck* | Fabaceae | 3 |
| (kesikesika) | *Dracaena reflexa* | Asparagaceae | 3 |
| Lemon (voangy tsoha) | *Citrus* sp | Rutaceae | 2 |
| Soursop (voantsokigny) | *Annona muricata* | Annonaceae | 2 |
| (ampaly) | *Streblus mauritianus* | Moraceae | 2 |
| Mirliton squash (sosoty) | *Sechium edule* | Cucurbitaceae | 2 |
| Cattley guava (gavo de chine) | *Psidium cattleianum* | Myrtaceae | 1 |
| Cocoa (kakao) | *Theobroma cacao* | Malvaceae | 1 |
| Japanese medlar (pibasy) | *Eriobotrya japonica* | Rosaceae | 1 |
| Papaya (voapaza) | *Carica papaya* | Caricaceae | 1 |
| Peach (peche) | *Prunus persica* | Rosaceae | 1 |
| (akasia) | *Acacia mangium* | Fabaceae | 1 |
| (aramy) | *Canarium madagascariensis* | Burseraceae | 1 |
| (menahy) | *Erythroxylum nitidulum* | Erythroxylaceae | 1 |
| (monkara) | *Macaranga* sp. | Euphorbiaceae | 1 |
| Ficus sp. (voara) | *Ficus* sp. | Moraceae | 1 |
| Raffia palm (Raphia) | *Raphia farinifera* | Arecaceae | 1 |
| (daboara) | *Cucurbita* sp. | Cucurbitaceae | 1 |

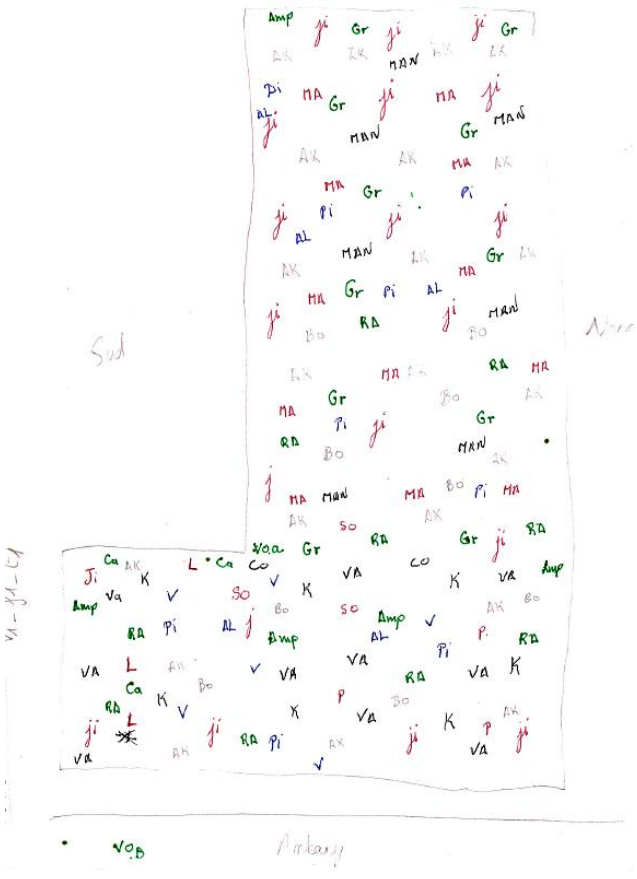
*Appendix 4: Classification of plant species cited by farmers within their clove-based tsabo according to their local functions and botanical category.*

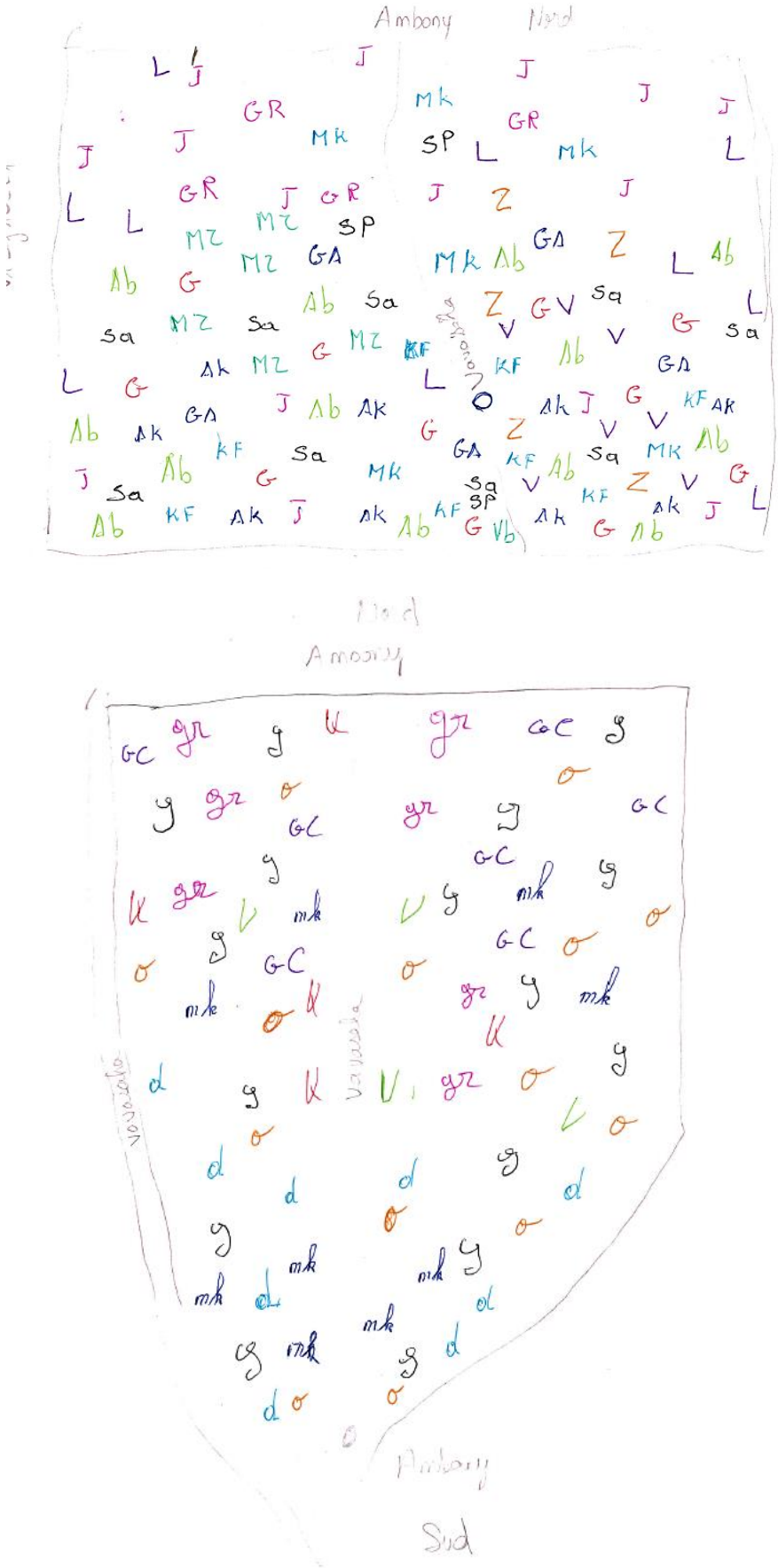


*Appendix 5: Occurrence of 14 frequent plant species within* tsabo *with respect to the two variables of spatial organization used for coding and analyzing the participatory maps of* tsabo*: the position of the species according to the topographical gradient (top, center, bottom) and the way in which each species was spatially distributed compared to the other species over the total area of* tsabo *(random, edge, aggregated).*

| **Variable (Fisher Test)** | **Species distribution in the *tsabo* ( *p*-value < 0,0005)** | | | **Location in the *tsabo* in relation to topography (*p*-value < 0,05)** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Modality** | **aggregated** | **boundary** | **random** | **bottom** | **center** | **top** |
| Avocado | 1 | 4 | 6 | 4 | 7 | 2 |
| Bamboo be | 0 | 8 | 1 | 7 | 1 | 1 |
| Banana | 6 | 0 | 8 | 11 | 6 | 5 |
| Breadfruit | 6 | 4 | 6 | 10 | 6 | 2 |
| Clove | 0 | 0 | 17 | 15 | 16 | 17 |
| Coffee | 4 | 0 | 6 | 8 | 4 | 2 |
| Gliricidia | 2 | 0 | 6 | 5 | 3 | 4 |
| Guiana chestnut | 2 | 0 | 5 | 5 | 4 | 1 |
| Jackfruit | 4 | 6 | 12 | 13 | 12 | 3 |
| Lychee | 2 | 17 | 2 | 8 | 7 | 8 |
| Orange | 0 | 2 | 6 | 2 | 7 | 1 |
| Silky oak | 0 | 1 | 8 | 2 | 3 | 6 |
| Traveller's palm | 2 | 1 | 5 | 2 | 3 | 5 |
| Vanilla | 7 | 0 | 5 | 9 | 1 | 2 |

*Appendix 6: Trois exemples de carte participative de* tsabo.




Ambony
Nord
Ambony
Sud

*Appendix 7: Occurrence des différentes contribution des espèces de* tsabo *(Díaz et al. 2018) reposant sur la classification des usages et des fonctions de l'agrobiodiversité définie par les paysan.ne.s du village de Vohibary. NCP : Natural Contributions to People.*

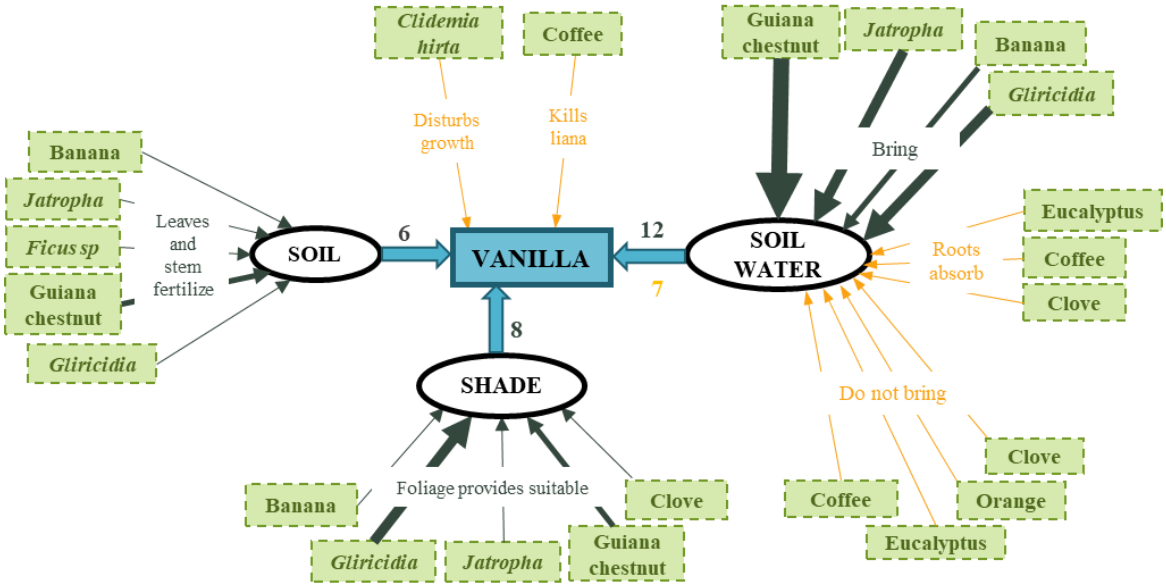
| Scientific name | Food | Wood | Incomes | Soil enrichment | Soil watering | Shading | Total NCP/species |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Musa sp. | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 |
| Coffea canephora | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 5 |
| Pachira aquatica | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 4 |
| Gliricidia sepium | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 4 |
| Artocarpus heterophllus | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 4 |
| Albizia stipulata | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 3 |
| Albizzia lebbeck | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 3 |
| Grevillea robusta | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 3 |
| Persea americana | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 3 |
| Psiadia altissima | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 |
| Ravenala madascarensis | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| Ficus sp | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 |
| Artocarpus altilis | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 |
| Manihot sp | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 |
| Psidium cattleianum | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| Syzygium aromaticum | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 2 |
| Litchi chinensis | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| Mangifera indica | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| Citrus sinensis | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 |
| Piperum nigrum | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| Saccharum officinarum | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 |
| Dracaena reflexa | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| Cocos nucifera | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| Elaeis guineensis | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| Ananas comosus | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| Annona muricata | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| Acacia mangium | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Streblus mauritianus | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Canarium madagascariensis | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Cucurbita sp | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Citrus sp (hybrid) | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Syzygium samarangense | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Citrus reticulata | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Erythroxylum nitidulum | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Macaranga sp | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Rafia farininfera | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Litsea glutinosa | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Sechium edule | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Annona squamosa | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Bambusa sp. | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Theobroma cacao | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Eucalyptus sp | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Eriobotrya japonica | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Spondias dulcis | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Citrus sp | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Carica papaya | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Prunus persica | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Nephelium lappaceum | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Vanilla planifolia | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Dioscorea sp | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| **Total species/NCP** | **31** | **22** | **12** | **12** | **4** | **11** | |

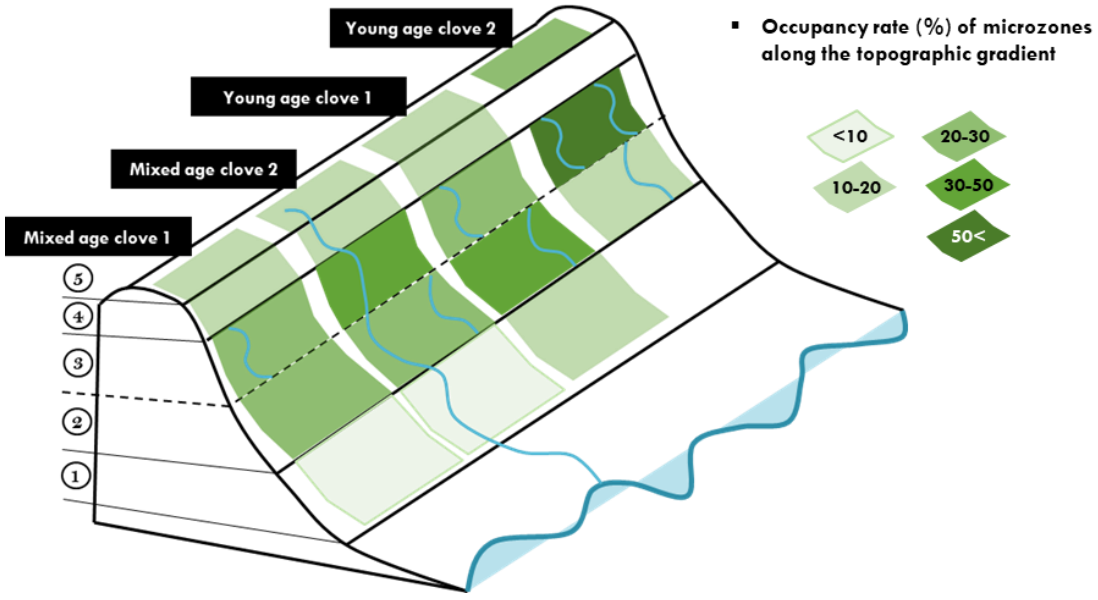
*Appendix 8: Noms et descriptions de différentes variétés de bananiers citées par les paysan.ne.s lors des enquêtes conduites pour l'étude du réseau de circulation du bananier.*

| **Nom local** | **Description du fruit et/ou de son usage** |
|---|---|
| *Andatra* (âpre) | Les fruits sont de taille moyenne et laissent une sensation d'âpreté dans la gorge. |
| *Betavia hiva* ou *ambo* | Ce sont les deux variétés les plus communes, elles produisent des fruits très semblables mais ce qui les différencie et la hauteur de son stipe, le stipe de la variété ambo (« haut ») est plus haut. |
| *Lahy* (garçon) | Les fruits sont très longs (en référence au sexe masculin ?) et se mangent cuits. |
| *Ambarobaboaka* | Les fruits ont une forme anguleuse et se mangent cuits. Les bananes sont utilisées pour la transition alimentaire des enfants à partir de 6 mois : les fruits sont séchés, écrasés pour obtenir de la poudre qui est ensuite mélangée avec de l'eau pour obtenir une boisson, appelée *koba*, qui sera donnée à l'enfant. |
| *Biriragna* ou/et *telo rirany*<br>*Mihonka*, ou/et *ramihonkogno* | Ces deux appellations désignent peut-être la même variété (Pas d'autres information). |
| *Carre* | Les fruits ont une forme carrée et une peau de couleur rosâtre. |
| *Daka* | Les fruits murissent après avoir donné un coup de pied au stipe du bananier. |
| *Lareunion* | Selon les paysan.ne.s, cette variété auraient été introduites par les réunionnais. |
| *Voantsiroko* | Les fruits sont de petite taille. Cette variété est assez présente dans les *tsabo*. |

*Appendix 9: Carte d'interactions des espèces positives et négatives du vanillier.*




*Appendix 10: Répartition spatiale des différents types de micro-zones (cf. chapitre 5) le long de la toposéquence d'une* tanety. *Le taux d'occupation (occupancy rate) de chaque zone de la toposéquence (1, 2, 3, 4, 5) par chaque type de micro-zone a été calculé sur la base de la fréqeunce des micro-zones présentes sur chaque zone : par exemple, dans le cas du type "mixed age clove 1", moins de 10% des micro-zones de ce type se trouvent dans la zone 1 de la toposéquence.*



Le travail présenté ci-dessous correspond à une partie des livrables produits par Esteban Stephan et Rafaël Figueroa Brollo à l'issue de leur module tutoré (cf. Activités d'encadrement et d'enseignement) pour lequel j'ai participé au co-encadrement avec Christophe Le Page. Ces productions sont l'aboutissement de plusieurs ateliers et de réunions avec l'équipe qui ont permis de décider collectivement de certains aspects du jeu, mais ce qui est présenté ci-dessous sont les règles du jeu écrites par Esteban Stephan et Rafaël Figueroa Brollo et qui ont été testées lors de leur atelier de fin de module en février 2022.




## Buts du jeu et objectifs

Le jeu est utilisable pour tout enjeu d'organisation agroforestière collective. Il permet de favoriser le dialogue entre les différents acteurs impliqués dans le développement agricole de cultures agroforestières.

Le jeu offre l'occasion de partager par la discussion différentes formes de gestion de l'agrobiodiversité, telles que les pratiques d'association d'espèces, la valorisation des services écosystémiques, les techniques de fertilisation, les pratiques d'approvisionnement en plantules/boutures, la gestion de l'impact écologique, etc. Il offre également l'occasion de partager différentes stratégies d'adaptation à un changement et/ou de réaction à une perturbation. Il y a deux buts du jeu principaux au cours d'une partie :

- Un but individuel pour chaque joueur : subvenir aux besoins de sa famille dans ce contexte difficile en pratiquant des activités génératrices de vivres et de revenus ;
- Un but collectif : faire émerger et partager les savoirs et savoir-faire permettant de générer au quotidien une meilleure résilience face aux imprévus, une pratique durable et une amélioration des conditions de vie.

Le projet général ayant mené à la conception du jeu AgroTsabo implique des objectifs sous-jacents visant d'une part les joueurs, et d'autre part les chercheurs :

| **Objectif pour les joueurs** | **Objectifs pour les chercheurs** |
|---|---|
| **Objectif 1 :** Explorer de nouvelles stratégies individuelles et permettre le partage des différentes formes de gestion de l'agrobiodiversité et/ou de gestion de l'espace. | **Objectif 4 :** Mieux comprendre, selon la nature du changement, comment les agriculteurs réagissent, modifient leur pratiques agricoles et/ou leur stratégie (à l'échelle du ménage) en réponse à ces changements (NB : économiques, climatiques, environnementaux…). |
| **Objectif 2 :** Favoriser le dialogue et le partage de savoirs/savoir-faire entre les différents acteurs impliqués dans le développement agricole de | **Objectif 5 :** Réfléchir à la place de l'agroforesterie dans ces réponses au changement et amener à réfléchir aux conditions dans lesquelles cette pratique agroécologique |

| | |
|---|---|
| cultures agroforestières et mettre en évidence les relations entre acteurs. | pourrait être plus largement développée dans la zone en fonction des attentes et des contraintes des ménages ruraux. |
| **Objectif 3 :** Permettre grâce à l'outil de faire remonter certaines problématiques auprès d'acteurs du développement et de la recherche afin de favoriser la prise en compte des mécanismes de résilience dans les actions de développement des territoires et des filières agricoles, ce grâce à la collaboration de coopératives et d'associations locales. | **Objectif 6 :** Collecter des connaissances empiriques sur les avantages ou désavantages des associations d'espèces/services écosystémiques permettant d'ouvrir de nouveaux axes de recherches en agroforesterie (expérimentations en milieu contrôlé ou paysan). |

## Nombre de joueurs

Les joueurs peuvent être de 1 à 20, sur quatre plateaux, seuls ou par équipe. Nous conseillons de limiter à 3 personnes par plateau de jeu, c'est à dire 12 joueurs. Tous les plateaux n'ont pas besoin d'être utilisés à chaque partie. Une partie peut-être menée sur un seul plateau, notamment pour 1 joueur ou dans un contexte de démonstration, la facette « négociation entre joueurs » du jeu ne pourra par contre pas être expérimentée ainsi.

## Nombre de facilitateurs

Pour une version plateau nous préconisons un minimum de 1 facilitateur général, plus 1 facilitateur pour deux équipes et un observateur pour deux équipes. Ce qui nous donne un total de 5 personnes si les 4 plateaux de jeux sont utilisés. Mais différentes formes sont imaginables selon le degré d'appropriation du jeu par les facilitateurs.

## Sensibilisation

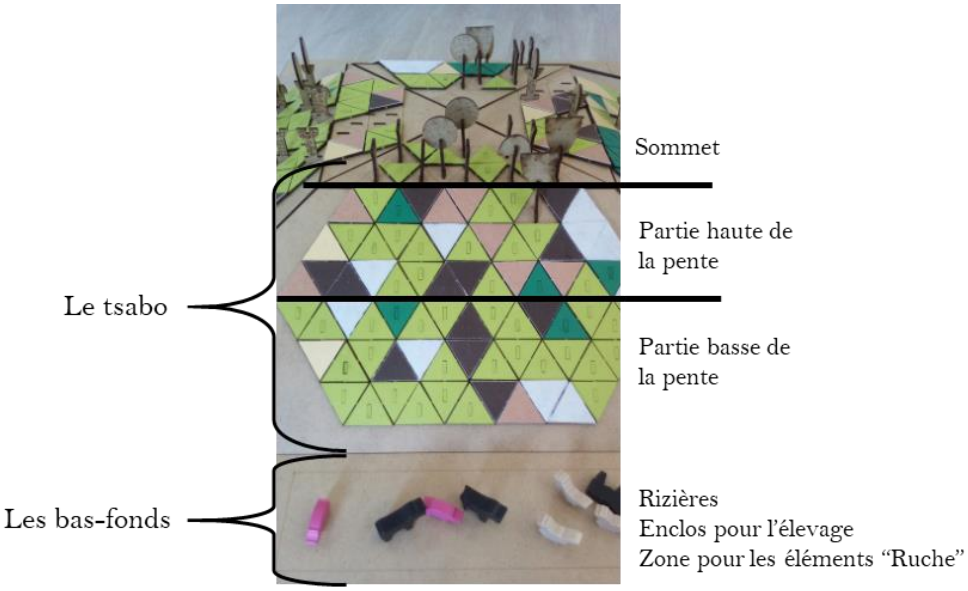
Le joueur incarne un ménage malgache ayant pour source de revenus principale l'agroforesterie. Sa parcelle, son t*sabo*, se situe sur une colline de Vavaténina. Le but du joueur est de subvenir aux besoins de sa famille en termes de Nourriture, de Bois, et d'Argent. Le tour correspond à une unité temporelle imprécise plus longue qu'une année. A la fin du tour, il est demandé au joueur de répondre aux besoins précédemment cités. Pour y répondre, celui-ci peut cultiver des espèces pour leur attrait économique sur les marchés mondiaux, pour leur valeur nutritive ou encore pour leur propension à produire du bois. Il peut aussi faire de l'élevage de poules, de porcs, de zébus ou d'abeilles. Il récoltera ainsi des Ressources qu'il pourra échanger au marché à des taux désavantageux, ou commercer avec les autres joueurs. Sa force de travail, sa Main d'Oeuvre, peut aussi être vendue à d'autres joueurs. Enfin, il peut transformer les matières premières en Huile Essentielle ou en Charbon. Pour ouvrir de nouvelles stratégies, il peut également souscrire à la coopérative. Pour finir, avec leurs économies, les joueurs pourront faire de « Grands Achats » comme une enceinte, une moto, une maison… Mais attention ! Des évènements économiques, naturels ou sociaux peuvent survenir, pour le bonheur ou le malheur des ménages. Il faudra avoir suffisamment de résilience dans ces pratiques agroforestières pour prendre soin de sa famille !

## Les éléments du jeu

### A - Le plateau :

Il représente une colline du Nord de Madagascar. Le climat y est chaud et humide. Le plateau est composé de 4 surfaces de jeux de 110 cases, placées sur les faces les plus larges. Une surface représente un *tsabo*. C'est le nom donné au type particulier d'agroforesterie malgache ici étudié.

Une surface de jeu se décompose en quatre parties :




En début de partie :

Les facilitateurs préparent le plateau de jeu avant l'arrivée des joueurs. Suivant le scénario choisi et les calibrages effectués, le *tsabo* de départ peu prendre différentes formes. Nous avons ici choisi le calibrage suivant du *tsabo* initial :

- 72 jachères jeunes
- 28 jachères anciennes
- 4 girofliers (dont un sur le sommet du *tsabo*)
- 3 arbres à bois (dont un sur le sommet du *tsabo*)
- 2 fruitiers
- 1 arbre à litchi

Tout ces éléments sont au stade final de leur croissance dès le début de la partie. Le joueur doit décompter sa main d'œuvre à partir de la jauge « Nombre d'arbre/Effort par tour » dès le premier tour. Il commence sans ressources et doit réussir à finir le tour avec sa première récolte.

### B - Les pions ressources :

Ressources :

- *Argent* : Des jetons jaunes symbolisent l'argent.
- Il y en a de trois tailles, petits, moyens et grands, qui valent respectivement 1, 5 et 10 unités monétaires.



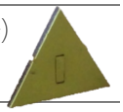
- *Nourriture* : Des jetons verts symbolisent la nourriture. Il y en a de trois tailles, petits, moyens et grands, qui valent respectivement 1, 5 et 10 unités alimentaires.



- *Bois* : Des jetons marrons symbolisent le bois. Il y en a de trois tailles, petits, moyens et grands, qui valent respectivement 1, 5 et 10 unités ligneuses.

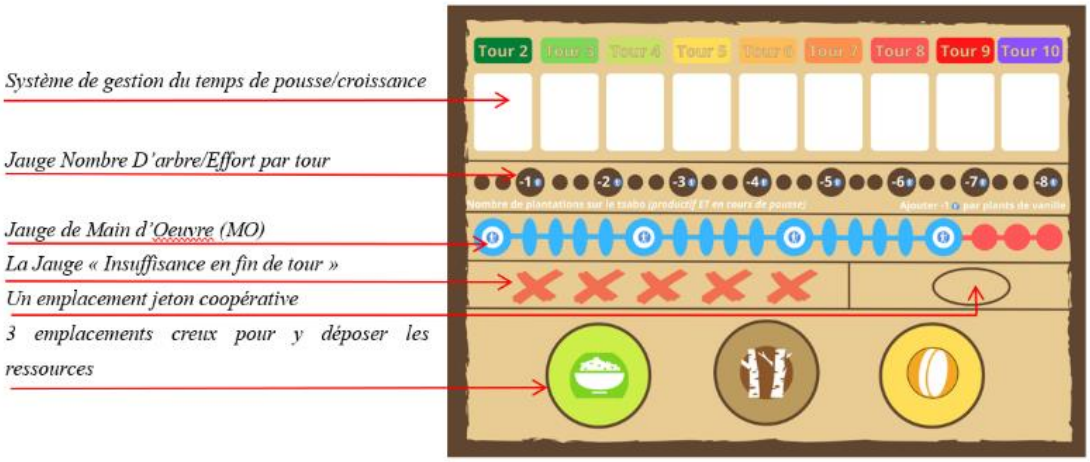


### C - Les éléments du *Tsabo* :

| Surfaces non cultivées | |
|---|---|
| Jachère ancienne (arborée)  | Jachère jeune (arbustive)  |
| Pâturage  | |
| **Surfaces cultivées** | |
| Riz *Tavy*  | Brèdes  |
| Bomafana  | |
| **Plantation** | |
| Giroflier  | Vanille  |
| Litchi  | Fruitier  |
| Arbre à bois  | |
| **Elevage** | |
| Miel (limité à 2 ruches par *tsabo*)  | |
| Poulet  | |
| Porc  | |
| Zébu  | |

**D - Les interfaces individuelles de gestion :**

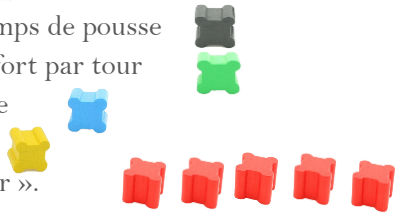
Chaque joueur ou groupe de joueur en obtient une.




<u>Les pions à utiliser sur l'interface de gestion individuelle :</u>

Ceci pour chaque interface individuelle de gestion :

- 1 marqueur pour la jauge Gestion du temps de pousse
- 1 marqueur pour la jauge Nb d'arbre/effort par tour
- 1 marqueur pour la jauge Main d'Oeuvre
- 1 marqueur « Inscrit à la coopérative »
- 5 marqueurs « Insuffisance en fin de tour ».



<u>Les différentes parties de l'interface de gestion individuelle :</u>

*Le Système de gestion du temps de pousse/croissance*

Un pion que l'on avance à chaque tour d'une case marque l'avancée du jeu.

Lorsque l'on souhaite placer un plant ou un animal d'élevage sur le plateau de jeu, il faut :

- Placer la base du plant ou de l'animal concerné sur le plateau de jeu à l'endroit souhaité
- Placer la partie haute du plant ou de l'animal concerné sur la case du « système de gestion du temps de pousse/croissance » adéquat. Les temps de pousse/croissance sont affiché sur les « Fiche de Gestion ». Il s'agit donc de placer la partie haute du plant ou de l'animal sur la case correspondant au Tour Actuel + Temps de Pousse de la plante ou de l'animal en question.

Lorsque le pion matérialisant l'avancée du jeu arrive sur une case contenant les parties hautes de certains plants/animaux, alors le joueur peut les placer en tout début de tour sur les bases prévues à cet effet déjà présentes sur le *tsabo*. Les plants deviennent alors productifs, et les animaux d'élevages peuvent être vendus.

*La Jauge Nombre D'arbre/Effort par tour*

Il s'agit ici de compter le nombre d'arbre productifs ET en cours de pousse, ainsi que le nombre de ruches et d'animaux d'élevage. Le pion est ensuite déplacé sur la jauge en fonction de ce nombre total. La jauge indique alors l'effort de main d'œuvre nécessaire à la culture et à l'élevage à chaque tour. Si le pion est placé sur un numéro, c'est celui-ci qui prévaut. Sinon, c'est le numéro précédent le pion qui prévaut pour la modification de la jauge Main d'Oeuvre.

*Attention ! :*
*- La culture de Vanille demande plus de main d'oeuvre par tour, il faut ajouter +1 par plant de vanille au décompte des arbres/animaux sur le tsabo.*
*- L'élevage du zébu demande nécessite d'enlever 1 en plus de la jauge de main d'oeuvre à chaque tour pour chaque zébu dans l'enclos.*

*La Jauge de Main d'Oeuvre (MO)*

La jauge de main d'œuvre définit le nombre de disponible pour effectuer de nouvelles plantations. Cette jauge contient 15 paliers bleus et 3 paliers rouges. Elle est influencée par la jauge « Nombre D'arbre/Effort par tour ». La zone rouge de la jauge main d'œuvre représente un effort supplémentaire pouvant être effectué par les ménages au sacrifice de leur temps de repos. **Elle ne peut pas être utilisée deux tours d'affilée**. La main d'œuvre peut être vendue en négociant avec d'autres joueurs, le prix est à définir entre les joueurs.

*La Jauge « Insuffisance en fin de tour »*

Lorsqu'un joueur ne peut subvenir aux besoins de sa famille en fin de tour, il pose +1 pion rouge par type de ressources non-payées lors de la taxe de fin de tour sur l'une des croix prévues à cet effet. Lorsque les 5 croix sont recouvertes de pions rouges, le ménage meurt et le joueur a perdu.

*Un emplacement jeton coopérative*

Cet emplacement sert simplement à signifier que le joueur a payé sa participation à la coopérative à la fin du tour précédent et qu'il peut donc bénéficier des avantages de la coopérative jusqu'à la fin du tour actuel.

*3 emplacements creux pour y déposer les ressources*

- Vert : Nourriture (N)
- Couleur Bois : Bois (B)
- Jaune : Argent (A)

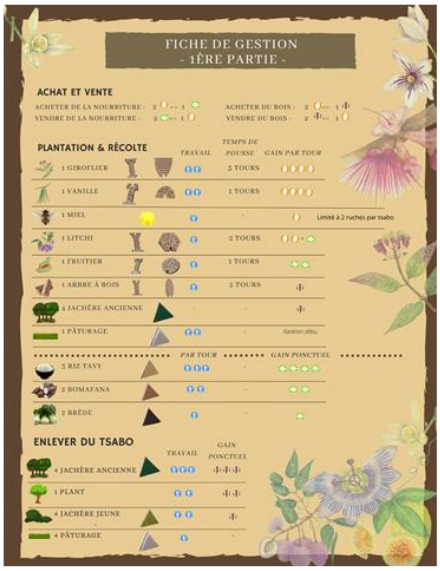
**E - Les fiches d'aide au jeu**

Trois fiches d'aide au jeu existent. Elles sont disponibles pour le joueur dès le début de la partie sauf pour la fiche **Fiche de gestion : 2ème partie**

1) Fiche **Tour de jeu** qui rappelle les différentes étapes d'un tour de jeu

2) La **Fiche de Gestion – 1ère partie** offre les clefs de gestion du Tsabo et le calibrage des valeurs. Cette fiche peut aider le joueur à mettre en place sa stratégie




3) La **Fiche de Gestion – 2ème partie** est à mettre à disposition du joueur pour le facilitateur lorsque la situation économique du joueur lui permet d'envisager les nouvelles stratégies que cette fiche de gestion permet




Transformations

Deux types de transformations existent :

*L'Huile Essentielle*

Pour fabriquer de l'huile essentielle, il vous faudra louer un alambic (5 ), avoir du bois pour le foyer permettant la distillation (3 ), et un peu de votre force de travail (1 ). Il vous faudra également de la matière première, c'est à dire des branches de girofliers. Pour cela vous devez tailler 3 girofliers de votre *tsabo*. Ils mettront 2 tours pour repousser et vous offrir une nouvelle récolte ou la possibilité d'être taillés de nouveau. Vous enlevez donc le morceau supérieur de votre giroflier sur le *tsabo* et le

placez dans votre « système de gestion du temps de pousse/croissance » de votre « interface individuelle de gestion » dans la case correspondant à : « tour actuel + 2 ».
Vous vendez ensuite votre huile essentielle et obtenez 18

*Le Charbon de Bois*

Pour faire du charbon de bois il vous faudra de votre temps de travail (3) et de la matière première, ici du bois (6 ). Vous vendez ensuite le charbon ainsi transformé et obtenez 16

*Il est tout à fait possible d'effectuer une transformation durant le temps de « Gestion du Tsabo » ou durant le temps « Récolte ». Attention cependant, pour pouvoir effectuer une transformation durant le temps de « récolte » il faut avoir sauvegardé des points de MO, ou en acheter à un autre joueur qui en aurait sauvegardé.*

Coopérative

S'inscrire à la coopérative donne accès à la « Fiche coopérative ». Cette fiche résume les apports de la coopérative.




**F - Le tableau des évènements :**

Le tableau des évènements est inconnu des joueurs, chaque colonne est découverte durant le tour correspondant, au moment précisé dans la « Fiche tour de jeu ». On applique alors les différentes spécificités du tour.

| | 1ère période | | | | | | 2nd période | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Grille des évènements | Tour 1 | Tour 2 | Tour 3 | Tour 4 | Tour 5 | Tour 6 | Tour 7 | Tour 8 | Tour 9 | Tour 10 |
| Cyclone | VOUUUUFF | | | | | | | | | |
| Sécheresse | Sécheresse | | | | | | Sécheresse | | | |
| Vol de vanille | | | | x | | | x | | | |
| Prix de la vanille | = | - | - - | = | + | ++ | = | = | -- | - |
| Prix du giroflier | = | = | + | = | = | = | = | - | - | - |
| Prix du litchi | = | + | = | = | - | = | + | = | - | - |
| Débriefing de fin de tour | | | Ici ! | | | Ici ! | | | | Débriefing général |

- 1ère/2nde période (non obligatoire) : il peut être intéressant de démarquer les deux périodes. Elles peuvent être jouées sur deux demi-journées de la même journée, et la « Fiche de Gestion – Partie 2 » ainsi que la fiche « Coopérative » peuvent être introduites au début de la 2nde partie du tableau des évènements. Toutefois, suivant le calibrage général du jeu, il peut être intéressant d'introduire ces fiches plus tôt, lorsque les joueurs ont suffisamment de ressources pour arpenter les nouvelles stratégies proposées.

- Cyclone : le « VOUUUUFF » se veut imiter le bruit du vent dans un cyclone. Les règles de la carte évènement « Cyclone » sont à appliquer immédiatement lorsqu'il apparaît.

- Sécheresse : Les règles de la carte évènement « Sécheresse » sont à appliquer immédiatement lorsque le mot « sécheresse » apparaît sur le tableau.

- Vol de Vanille : Les règles de la carte évènement « Vol de Vanille » sont à appliquer immédiatement lorsque le «X» apparaît sur le tableau.

- Prix de la/du Vanille/Giroflier/litchi : Ces lignes du tableau représentent les variations économiques des produits de culture de rente sur le marché international. Les variations ne sont valables que pour le tour où elles apparaissent et ne s'accumulent pas à chaque tour.

Lorsque le symbole est « = », le gain par plant lors de la récolte durant ce tour est identique à celui indiqué sur la « Fiche de gestion : 1ère partie »

Lorsque le symbole est « + », le gain par plant lors de la récolte durant ce tour est supérieur d'un pièce (+1 ) à celui indiqué sur la « Fiche de gestion :1ère partie »

Lorsque le symbole est « ++ », le gain par plant lors de la récolte durant ce tour est supérieur de deux pièces (+2 ) à celui indiqué sur la« Fiche de gestion :1ère partie »

Lorsque le symbole est « - », le gain par plant lors de la récolte durant ce tour est inférieur d'une pièce. (-1 ) à celui indiqué sur la « Fiche de gestion :1ère partie »

Lorsque le symbole est « --», le gain par plant lors de la récolte durant ce tour est est inférieur de deux pièces (-2 ) à celui indiqué sur la« Fiche de gestion :1ère partie »

- Debriefing en fin de tour : Un temps de parole est alloué à chaque joueur/groupe pour expliquer ses décisions, ses choix et ses stratégies. Le focus peut être dirigé par quelques questions des facilitateurs sur différents sujets en fonction des savoirs que les joueurs souhaitent échanger entre eux, ou de ceux que les chercheurs présents espèrent recueillir. (exemples : services écosystémiques, associations de plantes, recherche de résilience, … )

*Le tableau des évènements présenté ici est un scénario possible proposé au joueur. Suivant les objectifs spécifiques de la session de jeu, les facilitateurs peuvent imaginer d'autres scénarios. Cependant il s'agit de tester ces nouveaux scénarios en amont et de recalibrer les différents paramètres du jeu afin que le tout reste équilibré, simple et conforme aux réalités du terrain ainsi qu'aux réalités scientifiques.*

### G - Les Cartes évènements :

Les cartes évènements sont simplement là pour illustrer l'évènement aux yeux des joueurs lorsqu'il a lieu et pour rappeler les règles à appliquer à l'animateur. Ces règles peuvent être adaptées pour mieux coller aux réalités du terrains. Les évènements sont bien souvent terribles, il faudra avoir une stratégie suffisamment résiliente pour y survivre.



*Appendix 12: Abstract de la présentation orale réalisée lors du 4th World Congress on Agrofrestry, 20-22 mai 2019.*

**A holistic approach to analyze agroforestry heterogeneity at the cropping system and landscape scales in an agrarian locality in Madagascar**

*Juliette Mariel*1, Eric Penot*2, Hasina Herimandimby*3, Fanjaniaina Fawbush*4, Vanesse Labeyrie*5, Pascal Danthu*6*

*1 CIRAD, UR GREEN, F-34398 Montpellier, France.*

*2 CIRAD, UMR INNOVATION, F-34398 Montpellier, France.*

*3 ESSA, Université d'Antananarivo, Madagascar.*

*4 ESSA, Université d'Antananarivo, Madagascar.*

*5 CIRAD, UR GREEN, F-34398 Montpellier, France.*

*6 CIRAD, UR Hortsyst, F-34398 Montpellier, France.*

The multi-dimensional diversification of agroecosystems, from the plot to the landscape scale, is known to be a key factor of social-ecological systems resilience. Agroforestry research especially brought considerable insights on this issue by documenting the socio-economic, agronomic and environmental outcomes of this type of practices. However, the drivers of agroforestry practices' heterogeneity and its spatial patterns remain poorly understood. This requires a diachronic perspective as the observed agroforestry systems often result from the gradual implantation of tree in pre-existing plantations, fallows, forests or pastures. This study addresses this issue through an original diachronic approach at the landscape scale, which contrasts from more usual static approaches focusing on cropping systems. We characterized the drivers of the observed heterogeneity of agroforestry practices and its spatial patterns in the landscape of villages located in the Analanjirofo region on eastern coast of Madagascar. We analyzed especially the economic divers of practices and their evolution regarding to the history of the economic context. In these localities, small farmers cultivated for 50 years varied perennial crops (clove, litchi and fruits, vanilla, coffee…) within different patterns including complex agroforestry systems. Analyses were conducted in 2016 on both qualitative and quantitative data collected through farmers' surveys on the following topics: i) the plant species grown in local agroforestry systems, ii) farms socio-economic characteristics, and iii) economic evaluation at plot level. A land-use map was built in 2016 through photointerpretation of drone and satellite pictures, and was compared with a map from 1966 in order to understand agroforestry evolution and expansion in Analanjirofo landscape over the past 50 years. The survey showed that a wide diversity of agroforestry practices currently exists regarding their plant species composition. Agroforestry accounted for 20% of the land surface in one of studied locality, resulting in a highly heterogeneous landscape mosaic. By merging the analysis of farmers' survey and the diachronic analysis of the land-use map between 1966 and 2016, we were able to give insights on the economic, demographic and geographic processes that led to the observed heterogeneity of agroforestry practices and their spatial patterns. These results raise perspectives to understand how diversification processes improve socio-economic resilience of farmers by balancing incomes. Our results are relevant for supporting the orientation of social-ecological systems toward resilient trajectories.

*Appendix 13: Abstract de la présentation orale qui sera réalisée lors du 5th World Congress on Agroforestry, 17-20 juillet 2022.*

**Serious games as a way to foster social learning of local actors and researchers towards sustainable agroforestry management**

*Mariel Juliette*1, Andriambololonirina Mirana*1, Carrière Stéphanie*2, Coudel Emilie*1, Labeyrie Vanesse*1, Notaro Martin*3 Perrier Eva*4, Pascutto Tamara*5, Resque Gabriel*6, Rotenberg Miguel*7, Stephan Esteban*1, Le Page Christophe*1*

*1 CIRAD, UMR SENS, Montpellier, France*

*2 IRD, UMR SENS, Montpellier, France*

*3 CIRAD, UMR ABSys, Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, Ivory Coast*

*4 INRAE, UMR G-eau, Montpellier, France*

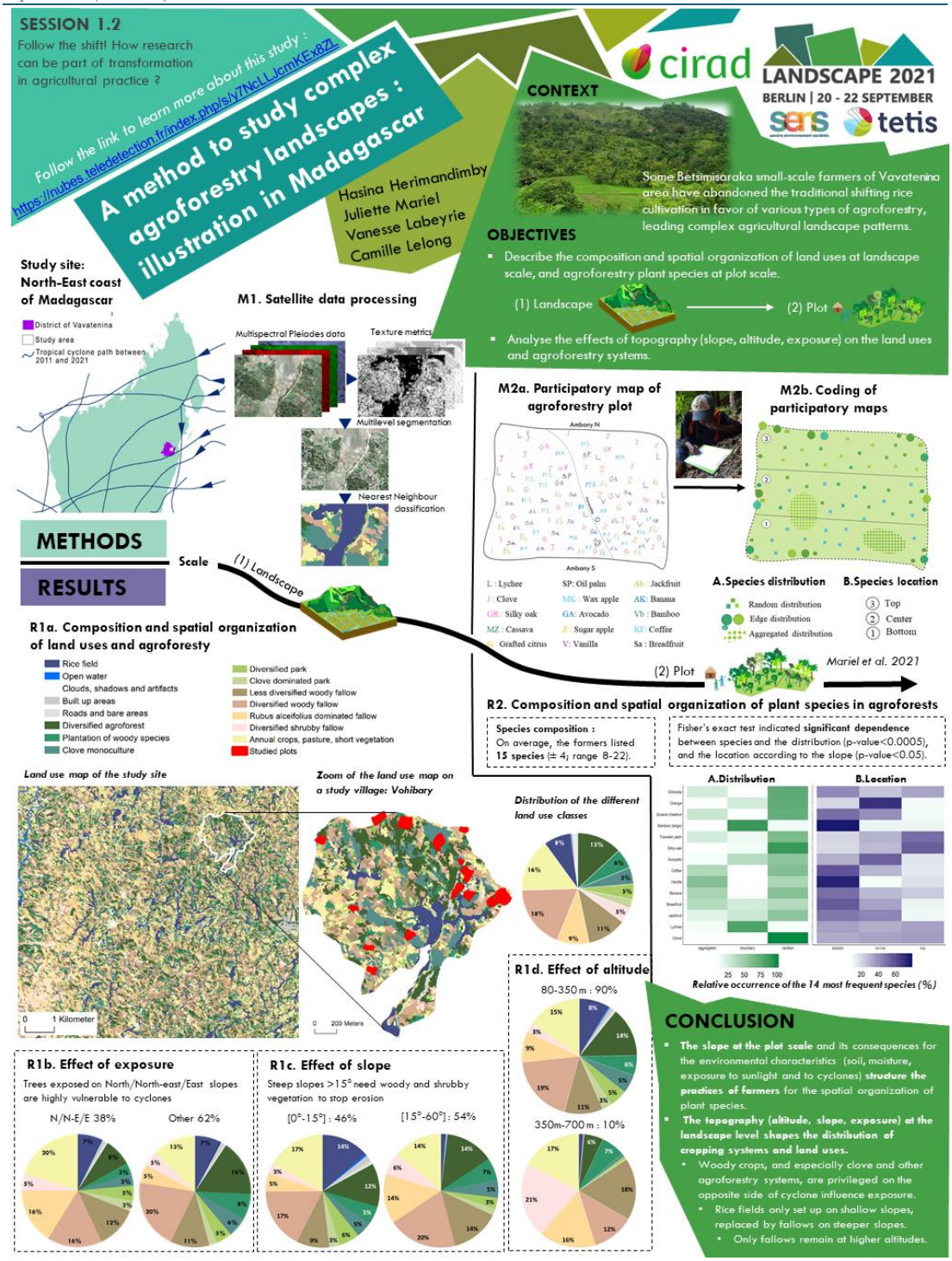
*5 Consultante en animaion et conceptrice de jeux sérieux*

*6 Universidade Federal Rural da Amazônia, Campus Paragominas, Paragominas, Brazil*

*7 Playtime www.play-time.fr*

To better understand the ways farmers interact with trees is key to any action-oriented research process aiming at supporting sustainable agroforestry management. Agroforestry systems are particularly complex agricultural systems involving diverse activities as well as covering a large biological diversity. Supporting the development of sustainable agroforestry systems hence requires specific tools for the exchanges of knowledge and discussion between the different actors, such as farmers, scholars, and extension workers. Serious games are commonly used either for collecting information and data (games for research) or for education and training (games for knowledge transfer). Using games to trigger and facilitate transformative changes represents a third way that has been promoted by specific participatory modelling approaches such as companion modelling. The game serves as an intermediate object allowing exchanges of viewpoints among participants. It builds on reality in a stylized form so that each user can find ways to project features of the socio-ecosystem that make sense for her/him. In contrast to the "expert system" vision where the tool is supposed to provide elements for selecting the best decision, here the game seeks rather to encourage exchanges between participants so as to share points of view and opinions on the functioning of the system represented. Finding a good balance to represent complex agroforestry systems with multiple activities and a high biological diversity while keeping this representation simple and easy to catch for participants is particularly challenging. In this communication, we describe and compare two serious games on agroforestry systems in the Brazilian Amazon and in Madagascar. Despite the specificities of both contexts, common mechanisms have been identified and formalised. We discuss the generic scope of these mechanisms and describe the outline of an “Agroforestry Systems Modelling Toolkit” that could be used in a wide variety of contexts.

*Appendix 14: Poster présenté par Hasina Herimandimby lors du colloque LANDSCAPE 2021, 20-22 septembre (en visio).*



**Rencontres d'Ecologie des Paysages**
11-13 octobre 2021
Rennes

# Comprendre la construction d'un paysage agraire hétérogène à Madagascar

*Une approche par l'étude des pratiques et des connaissances paysannes*

Juliette Mariel, Stéphanie M. Carrière, Verohanitra Rafidison, Vanesse Labeyrie

savoirs environnement sociétés

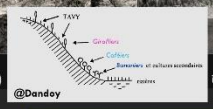



## CONTEXTE

- Paysages de collines, aux pentes + ou – abruptes ravinées par les pluies tropicales, dont la terre est cultivée par des paysan.nes de l'ethnie Betsimisaraka




Tavy : Agriculture itinérante sur brûlis (cultiver du riz, base de l'alimentation des Malagasy)




Caféiers sous ombrage (culture commerciale introduite par les colons)

**Façonnement d'un paysage agroforestier et hétérogène**

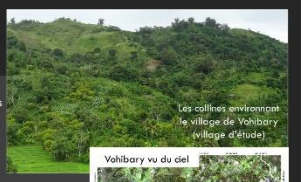
1966 → 2018

Période coloniale (1897-1960) : la plantation de cultures commerciales se développe dans des systèmes peu diversifiés (caféier, giroflier, vanille, poivrier).

Période caféicole (jusqu'aux années 90) : la caféiculture domine les bas de versants, et la pratique du *tavy* persiste.

Boom du giroflier (depuis les années 70): Le giroflier vient progressivement remplacer les caféiers et le *tavy*, en association avec d'autres cultures, vivrières ou non, dans des systèmes agroforestiers.

→ Changement des logiques d'organisation spatiale des cultures







## OBJECTIFS

Comprendre les logiques paysannes d'organisation de la diversité cultivée avec le giroflier en agroforesterie à l'origine du paysage hétérogène observé aujourd'hui.

Quelles sont les déterminants de ces pratiques d'organisation spatiale ?

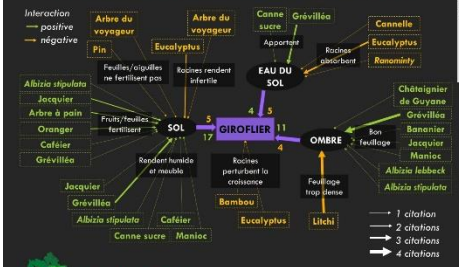
Comment les paysans organisent-ils les différentes cultures dans l'espace ?

## METHODES

### Carte mentale d'interactions entre le giroflier et les autres espèces

- ✓ Entretiens avec 17 paysan.nes pour documenter leurs connaissances sur les interactions positives et négatives du giroflier avec les autres espèces et le milieu physique
- ✓ Représentation sous la forme d'une carte d'interactions

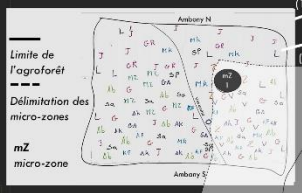
### Carte d'interactions positives et négatives du giroflier



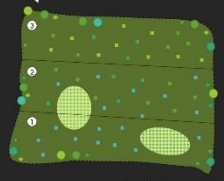

### Cartes participatives des parcelles agroforestières

- ✓ Réalisation par 17 paysan.nes de cartes de leur agroforêt: (1) représentation des espèces présentes par des lettres, (2) détourage des micro-zones (unités de gestion homogène) avec le papier calque






- ✓ Codage des 17 cartes d'agroforêts




28 micro-zones

(2)

*Diversité cultivée (A+B) citée par la paysanne enquêtée (carte illustrée ci-dessus)*

(A) MK : Jamblon
Z : Pomme cannelle
MZ : Maniac
SP : Palmier à huile
G : Agrume greffé

(B)
GR : Grévillea
GA : Avocatier
Ab : Jacquier
L : Litchi
J : Giroflier
KF : Caféier
V : Vanille
AK : Bananier
SA : Arbre à pain
Vb : Bambou

(1)

**Localisation des espèces selon la topographie**
3 En haut
2 Au milieu
1 En bas

**Distribution spatiale des espèces**
Aléatoire
Regroupée
En bordure d'agroforêt

**Diversité des associations d'espèces (mZ) avec le giroflier selon sa maturité**

Girofliers âgés et jeunes (<10 ans) associés avec

13 ± 2 espèces | 10 ± 3 espèces

Bananier, jacquier, arbre du voyageur les plus fréquents

**4 types de mZ**

Litchi et caféier les plus fréquents

12 ± 3 espèces | 5 ± 2 espèces

Girofliers jeunes (<10 ans) associés avec

*Différenciation des mZ basée sur l'indice de similarité de Jaccard et du clustering.*

**Organisation spatiale des 10 espèces les plus fréquentes dans les agroforêts étudiées**




## RESULTATS

L'agrobiodiversité citée par les paysan.nes se compose de 51 espèces dont 36 espèces d'arbres.

- Ces espèces ne sont pas distribuées aléatoirement dans les agroforêts → importance de la topographie
- Le giroflier, jeune ou âgé, est au moins associés à 5 espèces différentes dans des sous-unités spatiales des agroforêts (mZ).
- Les paysan.nes ont des connaissances détaillées sur les interactions positives et négatives entre les différentes espèces et le giroflier. Ces connaissances mettent en évidence les déterminants environnementaux qui expliquent les patrons de distribution observés.

## CONCLUSION

- La diversité des logiques d'organisation des espèces avec le giroflier est étroitement liée aux conditions du milieu et son hétérogénéité dans les agroforêts.
- Ces logiques d'organisation des cultures s'expliquent par les connaissances que les paysan.nes ont développé sur les interactions entre espèces, bien que les pratiques agroforestières soient assez récentes.
- Cette diversité de pratiques conduit à des agroforêts de structure et de composition multiples qui contribuent à l' hétérogénéité du paysage, dont les implications pour la biodiversité animale reste encore inexplorées.