



HAL
open science

Évaluation et récupération de la biodiversité et des services écosystémiques dans les systèmes forestiers tropicaux

Marie Ange Ngo Bieng

► **To cite this version:**

Marie Ange Ngo Bieng. Évaluation et récupération de la biodiversité et des services écosystémiques dans les systèmes forestiers tropicaux. Sciences de l'environnement. Université de Paris Saclay, 2023. tel-04180354

HAL Id: tel-04180354

<https://hal.science/tel-04180354v1>

Submitted on 11 Aug 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

Évaluation et récupération de la biodiversité et des services écosystémiques dans les systèmes forestiers tropicaux

Habilitation à diriger des recherches
de l'Université Paris-Saclay

Domaine scientifique : Écologie, Environnement et Évolution

Présentée et obtenue le 1^{er} Juin 2023

par

Marie Ange Ngo Bieng

UPR Forêts & Sociétés. Cirad

Campus International de Baillarguet, TA C-105/D

34398 Montpellier Cedex 5 France

Unidad Bosques y Biodiversidad en Paisajes Productivos. CATIE

CATIE Guatemala. 2^a. Avenida 7-15 zona 14, Los Arcos

Ciudad de Guatemala.

Composition du jury

Rapporteuse : Elise Buisson, UMR IMBE, Avignon Université - CNRS - IRD

Rapporteur : Pierre Michel Forget, UMR MECADEV CNRS-MNHN

Rapporteur : Cyrille Violle, UMR CEFÉ, CNRS

Examinatrice : Nathalie Frascaria-Lacoste, Laboratoire ESE, UPSaclay

Examinatrice : Sandra Luque, UMR TETIS, INRAE

Examineur : Philippe Birnbaum, UMR AMAP, Cirad

Table des matières

Remerciements	3
Résumé.....	4
Liste des figures.....	5
Quelques abréviations	7
1 Curriculum vitae	9
1.1 Parcours professionnel	10
1.2 Parcours académique	10
1.3 Encadrement d'étudiants	11
1.4 Activités d'enseignement	15
1.5 Responsabilités scientifiques académiques et de représentation	15
1.6 Financements des projets de recherche.....	16
1.7 Publications et communications scientifiques	18
1.8 Interventions dans les médias et vulgarisation scientifique.....	22
2 Résumé de mon parcours de recherche	24
2.1 Interactions spatiales entre différentes espèces au sein de peuplements forestiers plurispécifiques. 26	
2.1.1 Identification de patterns qui gouvernent la répartition spatiale d'un groupe d'individus arbre dans un peuplement donné	26
2.1.2 Interaction entre configurations spatiales et performances du système au sein des peuplements hétérogènes	32
2.2 Interactions spatiales entre individus et leur impact sur des processus écologiques naturels au sein de systèmes agroforestiers tropicaux.....	33
2.2.1 A l'échelle parcellaire	36
2.2.2 A l'échelle intraparcellaire, i.e. de l'individu	42
3 Projet de recherche et d'encadrements	46
3.1 Axe 1 : quelles sont les particularités de structure et de fonctionnement des systèmes forestiers naturels de l'anthropocène, y compris secondaires et dégradés.....	48
3.1.1 Structure, composition et fonctionnement des systèmes forestiers de montagne	48
3.1.2 Structure, composition et fonctionnement des systèmes forestiers tropicaux de production et secondaires.....	49
3.2 Axe 2 : quelles sont les trajectoires de récupération de la biodiversité et des services écosystémiques dans différents systèmes forestiers.....	52
3.3 Projets de recherche intégrant les deux précédents axes : ConForMa et Climate Rush	57
3.3.1 ConForMa : vers la gestion concertée forestière du futur : exemple de la gestion forestière communautaire	57
3.3.2 Climate Rush : un jeu sérieux pour communiquer sur l'extrême vulnérabilité des forêts tropicales au changement climatique	59
4 Conclusion	61
5 Références.....	63

Remerciements

Ce document propose une synthèse de 19 années de recherche, dont mes 3 années de thèse et mes 16 années comme scientifique du Cirad et scientifique associée au CATIE, partenaire du Cirad en Amérique centrale. Sans les citer toutes, je voudrais remercier les nombreuses personnes que j'ai croisées tout au long de ce chemin de recherche, mon travail est aussi le produit des interactions avec vous. Je voudrais aussi dire ici ma fierté d'être chercheuse au Cirad, remercier mes collègues Ciradiens et Ciradiennes pour leur engagement au « Sud » dans des contextes pas toujours faciles.

Je voudrais remercier les membres du jury qui ont évalué ce travail, et devant lesquels j'ai défendu mon engagement pour les recherches appliquées que je mène au Cirad, sur les systèmes forestiers tropicaux.

Ces recherches m'ont permis d'obtenir le titre de directrice de recherche, et d'obtenir la plus haute qualification universitaire en France, l'Habilitation à Diriger des Recherches (HDR).

Je dédie cet ultime diplôme académique : (i) à ma mère, Marie, à qui j'ai promis de faire des études pour être indépendante : je suis fière d'avoir tenu ma promesse ; (ii) à mon père, Samuel, qui a entrepris son dernier voyage seulement deux semaines après ma défense ; (iii) à ma sœur Doudou, qui brille pour moi dans l'au-delà.

Les travaux présentés sont le résultat de collaborations nationales et internationales avec des collègues, des étudiantes/étudiants, divers acteurs de terrains et de la recherche : je les remercie grandement, divers éléments de ce mémoire reflètent nos échanges. Je n'ai pas l'espace ici de les citer personnellement et je m'en excuse. J'ai une pensée particulière pour les étudiantes et étudiants en thèse et en Masters, dont la fraîcheur, la curiosité et l'engagement ravivent tous les jours ma fierté d'être scientifique, je les cite dans ce rapport. Je pense aussi aux collègues de mon unité de recherche Forêts et Sociétés, les scientifiques et les administratives. Mes remerciements vont aussi aux collègues de mon unité d'accueil au CATIE : Bosques y Biodiversidades en Paisajes productivos, et aux collègues des différentes unités de recherche des différents instituts de recherche en France et à l'international, que j'ai la chance de côtoyer sur des sujets divers qui stimulent ma recherche.

Un merci particulier à Sylvain Perret, mon directeur de département au Cirad, dont les conseils ont été des jalons pour l'initiation de mon processus d'HDR ; à Plinio Sist et à Bryan Finegan, mes DU et modèles ; à Emmanuelle Baudry, conseillère HDR dans mon domaine scientifique à l'UPSaclay ; et à Bernard Saugier qui m'a ouvert les portes d'Orsay il y a une vingtaine d'années.

Je remercie particulièrement mes relecteurs, qui ont pris sur leur temps de travail pour améliorer ma prose : Amah, Eric, Natacha, Philippe V, Sylvie et Plinio ; et aussi mes collègues, amis et famille qui ont assisté à ma soutenance notamment Juan Fernandez (et ses étudiants) et Pauline en salle. Je n'oublie pas ceux qui ont pris le temps de se connecter, merci beaucoup.

Je voudrais enfin avoir un dernier mot à l'endroit de MA petite famille, Matthieu, Maëva et Matéo, votre compagnie et votre soutien m'honorent : Maëva, ma pompière pour la terre (<https://www.youtube.com/@pompierespourlaterre1223>) ; Matéo qui veut à bord d'Orion faire partie des premières missions sur Mars ; Matthieu, une HDR appelle une autre... Je pense aussi à ma famille du Cameroun, Noé, Papy, Bebeto et Marina, votre simplicité et votre bonne humeur sont des réservoirs d'énergie positive.

Cette HDR clôture un processus, et en ouvre un autre où je continuerai de compter sur les riches interactions avec mes étudiants et étudiantes, auprès desquels j'espère susciter de nombreuses vocations scientifiques.

D'avance, merci pour votre confiance

Résumé

Dans l'objectif de présenter ma candidature pour une Habilitation à Diriger des Recherches de l'Université de Paris Saclay et associée à l'Ecole Doctorale ABIES, ce document présente mes cursus académique et scientifique.

J'y propose une synthèse de mes 19 années de recherche sur les écosystèmes forestiers. Ces travaux ont pour thème principal l'analyse des interactions entre différentes espèces au sein de communautés végétales hétérogènes (plurispécifiques, multistrates) ainsi que leur impact sur la réalisation de processus écologiques. Mes travaux analysent et modélisent les bases de la coexistence spatiale entre différentes espèces au sein de peuplements forestiers hétérogènes, et met en évidence des performances globales spécifiques, ou des spécificités de fourniture de services écosystémiques.

En plus de fournir des pistes nouvelles de description de systèmes forestiers hétérogènes, de compréhension des mécanismes influençant leur fonctionnement, mes résultats de recherche sont orientés vers la production de stratégies de gestion durable permettant de favoriser la coexistence des espèces en mélange dans des systèmes restaurés. Mon objectif est alors de mettre en place des actions d'ingénierie écologique pour favoriser dans ces systèmes restaurés la récupération de la biodiversité et des services écosystémiques dans les paysages tropicaux fortement dynamiques de l'anthropocène.

Le projet de recherche que je propose est centré sur l'évaluation et la récupération de la biodiversité et des services écosystémiques dans les systèmes forestiers tropicaux perturbés (non intacts, secondaires ou dégradés). Il implique, au sein de ces écosystèmes hétérogènes, la caractérisation et la modélisation : (i) de leurs particularités de structure et de fonctionnement ; (ii) de leurs trajectoires de récupération de la biodiversité et des services écosystémiques associés. Ce projet de recherche vise à définir dans quelles conditions la biodiversité et les services écosystémiques étudiés sont favorisés ou au contraire en état de vulnérabilité, et le cas échéant, sur des bases scientifiques fines, quelles actions pourraient être mises en place pour réduire leur vulnérabilité ou assister leur dynamique de récupération naturelle.

Liste des figures

Figure 1 : Résumé schématique de mes parcours académique et professionnel

Figure 2 : Schématisation de la place centrale de l'analyse des structures spatiales des individus (arbres) dans un peuplement dans mes problématiques de recherche

Figure 3 : Illustration schématique de la complémentarité entre mes actions passées et en cours de recherche, et mon projet de recherche au centre

Figure 4 : Illustration de deux types de structure spatiale, mélange d'agrégats monospécifiques et mélange « pied à pied » ou intime (Ngo Bieng *et al.*, 2013b)

Figure 5 : Illustration de structure spatiale régulière, aléatoire et agrégée, et des courbes de Ripley correspondante (Ngo Bieng, 2007)

Figure 6 : Génération d'états initiaux réalistes pour le module Oak-Pine, modèle de croissance spatialement explicite à l'échelle de l'arbre sur la plateforme de simulation CAPSIS.

Figure 7 : Comparaison de la productivité du chêne et du pin entre les deux types de mélange : le mélange d'agrégats monospécifiques (type 1) et le mélange « pied à pied » ou intime (type 2), (Ngo Bieng *et al.*, 2013b)

Figure 8 : Décomposition de la variabilité de la productivité pour le chêne et le pin en fonction des différentes sources suivantes : type de mélange (Type), pattern spatial au sein du type (PP), effet aléatoire parcelle (Plot), et effet aléatoire arbre (Tree)

Figure 9 : Schématisation du travail cartographique des peuplements agroforestiers étudiés, du peuplement au semis de points

Figure 10 : Schématisation de l'interaction entre structure spatiale des arbres et intensité d'attaque de deux bioagresseurs

Figure 11 : Contribution indépendante et contribution conjointe (pourcentage de la variance expliquée) de différentes variables liées aux effets ressource et climatique dans la variabilité de l'intensité d'attaque de la moniliose sur les cabosses de cacaoyer

Figure 12 : Typologie de peuplements agroforestiers à base de cacaoyers, construite sur la base de variables de diversité et de structure de la canopée.

Figure 13 : Illustration de la disponibilité de lumière et d'ombrage pour quatre types de système agroforestier.

Figure 14 : Illustration de l'exploration de paramètres du GLMM, qui consiste à faire varier les distances des voisins de cacaoyers suivis en fonction de leur identité, et d'observer la variation résultante de l'indice d'attaque

Figure 15 : Illustration de la relation linéaire entre richesse spécifique et altitude (Veintimilla *et al.*, 2019)

Figure 16 : Illustration de la variabilité de biomasse aérienne des arbres dans des parcelles de forêts secondaires au Costa Rica et au Nicaragua

Figure 17 : Exploitation en forêts secondaires matures, d'environ 100 ans, expérimentation du CATIE dans la zone de Turrialba au Costa Rica

Figure 18 : Illustration de dynamique forestière secondaire après abandon de zones pâturées, au Costa Rica

Figure 19 : Trajectoires de récupération estimées et modélisées de forêts de production et forêts secondaires

Figure 20 : Photo d'un temple Maya, s'élevant au-dessus de la canopée de la selva Maya, zone du parc national de Tikal

Figure 21 : Carte de la couverture forestière au Guatemala en 2016

Figure 22 : Le prototype 1 du jeu ClimateRush présenté à la fête de la science 2022, faculté d'éducation et zoo du Lunaret, à Montpellier

Quelques abréviations

ACOFOP : Asociación de Comunidades Forestales de Petén (Association des communautés forestières de Petén)

AgroParisTech : Institut national des sciences et industries du vivant et de l'environnement

AI INPP : Actions Incitatives (du Cirad) Incubateur Nouveaux Produits et Prestations

ATIBT : Association Technique Internationale des Bois Tropicaux

BEE BIOGET : (Master) Biodiversité Ecologie Evolution, Biodiversité végétale et Gestion des Écosystèmes Tropicaux

CATIE : Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (Centre Agronomique Tropicale de Recherche et d'enseignement)

CEMAGREF : Centre d'Étude du Machinisme Agricole et du Génie Rural des Eaux et Forêts (aujourd'hui inclus dans l'INRAe)

CEMCA : Centre d'Etude Mexicaines et Centraméricaines (UMIFRE Ministère de l'Europe et des Affaires étrangères, CNRS)

CIAT- Bioversity : Alliance of Bioversity International and the International Center for Tropical Agriculture

CIFOR - ICRAF : Center for International Forestry Research (CIFOR) and World Agroforestry

Cirad : Centre de recherche agronomique et de coopération internationale pour le développement durable des régions tropicales et méditerranéennes

ED SIBAGHE : Ecole Doctorale Systèmes Intégrés en Biologie, Agronomie, Géosciences, Hydrosciences, Environnement

ED ABIES : Ecole Doctorale Agriculture Alimentation Biologie Environnement Santé

ENGREF : École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (aujourd'hui incluse dans AgroParisTech)

FCCF : Forestry and Climate Change Fund

FFEM : Fonds Français pour l'Environnement Mondial

FTA CGIAR : Forests, Trees and Agroforestry Partnership of the global partnership that unites organizations engaged in research for a food secure future

GFC : Gestion Forestière Communautaire

INRAe : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

IRAD : Institut de Recherche Agricole pour le Développement (Cameroun)

IRD : Institut de recherche pour le développement

IUFRO : International Union of Forest Research Organizations

MTECT : Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires

NEPAD : Nouveau partenariat pour le développement de l'Afrique

NIP : Note d'Intention de Projet (processus FFEM)

NIFOS : National Institute of Forest Science (Korean)

NOP : Note d'Opportunité de Projet (processus FFEM)

OEFO : Observatorio de Ecosistemas Forestales (Costa Rica)

ONF : Office National des Forêts

ONFI : Office National des Forêts International

PHIM : Plant Health Institute of Montpellier

RFA : RainForest Alliance

SCAC : Service (Français) de Coopération et d'Action Culturelle

SupAgro : L' Institut Agro Montpellier

TmFO : Tropical managed Forests Observatory

UBBPP : Unidad Bosques y Biodiversidad en Paisajes Productivos (Unité de recherche forêts et biodiversité dans des paysages productifs)

UMR SYSTEM : Unité Mixte de Recherche Fonctionnement et conduite des systèmes tropicaux et méditerranéens (aujourd'hui incluse dans l'UMR ABSys : Agrosystèmes Biodiversifiés)

UPR F&S : Unité Propre de Recherché Forêts et Sociétés

USC : Universidad de Santiago de Compostela

WRI : World Resources Institute

WUR : Wageningen University & Research

1 Curriculum vitae

Ngo Bieng Marie Ange

Née le 24 juin 1979, à Akonolinga Cameroun

Nationalités : Française et Camerounaise (ethnies : Bassa et Eton)

Chercheuse, écologue forestière - Cirad (Centre de recherche agronomique et de coopération internationale pour le développement durable des régions tropicales et méditerranéennes)

Scientifique associée à l'unité de recherche « Forêts et biodiversité en paysages productifs (UBBPP) » du CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza – Centre agronomique tropical de recherche et d'enseignement), au Guatemala.

La figure présente une schématisation de mes parcours académique et professionnel.

Adresse professionnelle permanente :

UPR Forêts & Sociétés. Cirad. Campus international de Baillarguet, TA C-105/D. 34398 Montpellier Cedex 5 France

Adresse professionnelle en expatriation : CATIE oficina regional Guatemala. 2^a. Avenida 7-15 zona 14, Los Arcos. Ciudad de Guatemala.

Courriels :

marie-ange.ngo_bieng@cirad.fr

MarieAnge.Ngo@catie.ac.cr

Tel. : + 33 6 21 02 44 85 26 07 42 / +502 5694 1873

1.1 Parcours professionnel

10/2021- présent : Scientifique Cirad UPR F&S expatriée au CATIE (UBBPP), Guatemala ; spécialité : restauration des écosystèmes forestiers secondaires et dégradés, gestion forestière communautaire.

01/2017-09/2021 : Scientifique Cirad UPR F&S expatriée au CATIE (UBBPP) Costa Rica ; spécialité : restauration des écosystèmes forestiers secondaires et dégradés, exploitation forestière à impact réduit.

03/2015-12/2016 : Scientifique Cirad UMR SYSTEM expatriée au CATIE (Programa Agroforesteria Agronomía Sostenible), Costa Rica ; spécialité : écologue spécialisée en modélisation des agroécosystèmes complexes

06/2008-03/2015 : Scientifique Cirad UMR SYSTEM France ; spécialité : écologue spécialisée en modélisation des agroécosystèmes complexes

11/2004-11/2007 : Doctorante – CDD CEMAGREF France ; Titre : écologue spécialisée en modélisation de la structure spatiale de peuplements forestiers complexes

1.2 Parcours académique

Juin 2023 : Habilitation à Diriger des Recherches. ED ABIES. Université de Paris Saclay. Évaluation et récupération de la biodiversité et des services écosystémiques dans les systèmes forestiers tropicaux

11/2004-11/2007 : Thèse de Doctorat ; Engref – AgroParisTech. Titre : Construction de modèles de structure spatiale permettant de simuler des peuplements virtuels réalistes. Application aux peuplements mélangés chêne sessile – pin sylvestre de la région Centre.

09/2003-09/2004 : DEA ; Ecologie. Université Paris VI Pierre Marie Curie ; Université Paris XI Orsay; INAPG, ENGREF.

09/2002-09/2003 : Maitrise Biologie des Populations et Écosystèmes. Université Paris XI Orsay

09/2001-09/2002 : Maitrise Biologie et physiologie Végétale. Université Yaoundé I

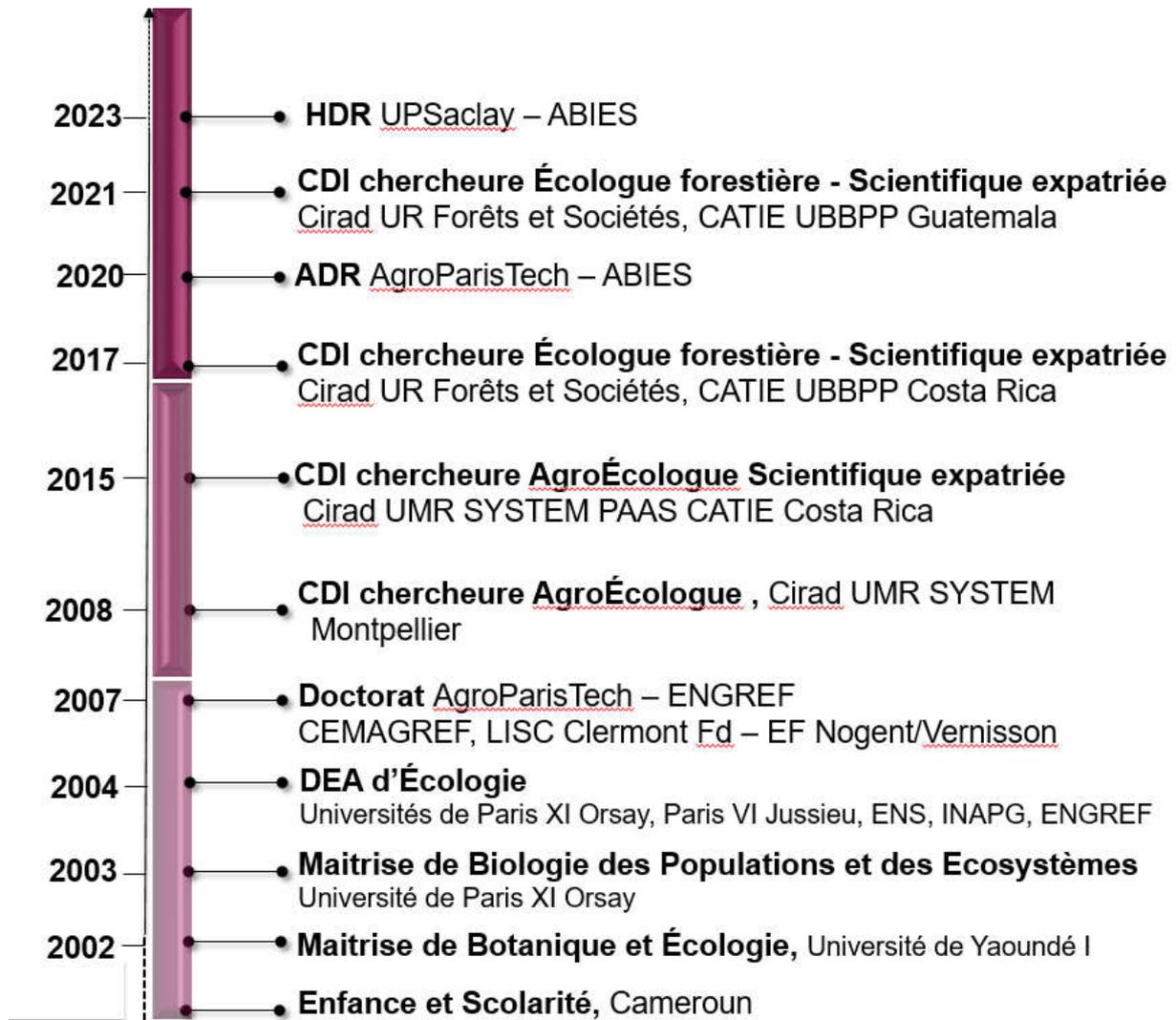


Figure 1 : Résumé schématique de mes parcours académique et professionnel

1.3 Encadrement d'étudiants

Dans le cadre de mes travaux de recherche, j'ai intégré de manière systématique la formation et l'encadrement d'étudiants, comme un moyen de transférer mes résultats de recherche, mais aussi de créer des vocations professionnelles : former de jeunes professionnelles et professionnels dans le domaine de la préservation et de la restauration des systèmes forestiers en général, et tropicaux en particulier. Depuis juin 2008 (date de mon entrée au Cirad), j'ai supervisé les travaux de recherche dans le cadre de quatre sujets de thèse (deux fois encadrante scientifique et deux fois directrice de thèse dont une fois avec ADR), 12 étudiants ingénieurs, et de niveau Master (huit fois encadrante scientifique principale et quatre fois membre du comité encadrant). En outre, j'ai apporté mon expertise au sein de cinq comités et jury de thèse, dont deux comités en tant que référente de l'ED ABIES. J'ai aussi proposé les projets d'accueil et supervisé les recherches de quatre jeunes chercheurs dont trois partenaires étrangers.

Pour les quatre sujets de thèse que j'ai ainsi proposés, encadrés et dirigés, j'ai trouvé des financements (salaires pour les trois thèses France à travers l'obtention de bourses et demie-bourses ED SIBAGHE, ED ABIES, financement Cirad) ; fonctionnement pour la thèse

l'Université de Santiago de Compostela (USC) en Espagne, à travers l'obtention d'actions incitatives du Cirad.

Je dirige actuellement deux travaux de thèse : la thèse d'Eliott Maurent pour laquelle j'ai sollicité et obtenu une ADR de l'ED ABIES en 2020, et la thèse de Cristina Vidal, de l'USC. Je suis aussi l'encadrante scientifique de la thèse de Maïri Souza Oliveira.

J'ai apporté un soin particulier à la communication des résultats des recherches effectuées dans ce cadre. Cela participe à mes objectifs de communication scientifique, mais aussi à la formation de jeunes chercheurs et étudiants à cet exercice. A cet égard, j'ai co-publié dans 14 de mes 22 publications scientifiques de rang A avec huit étudiants en thèse, de niveau Master, et chercheurs ou consultants que j'ai encadrés/dirigés. Je suis dernière auteure de sept de ces 14 publications.

Encadrement/direction de thèse

2022-2025. Maïri Souza Oliveira. Un cadre opérationnel pour évaluer la biodiversité des paysages forestiers tropicaux dans un contexte de fragmentation. ED GAIA. AgroParisTech. Encadrante principale : M A Ngo Bieng ; Directrice de thèse : Sandra Luque, DR TETIS INRAe

2021-2024. Cristina Vidal. Characterization of post fire vegetation resilience in the Paraguayan Humid Chaco. Universidad San Compostela (España) – Escuela de posgrado CATIE. Encadrant principal : Pablo Souza Alonzo, PhD, Universidad San Compostela. Directrice de thèse : M A Ngo Bieng.

2020-2023. Eliott Maurent. Estimation et modélisation des trajectoires de biodiversité dans des forêts tropicales perturbées en Amérique latine. ED ABIES. France. AgroParisTech. Encadrants : Bruno Héroult, HDR, F&S Cirad. Géraldine Derroire, PhD, EcoFog. Co-directeurs : M A Ngo Bieng, ADR de l'ED ABIES ; Bryan Finegan. CATIE, assimilé DR ABIES.

2010-2013. Gidoin Cynthia - Relations entre structure du peuplement végétal et bioagresseurs dans les agroforêts à cacaoyers. Application à trois bioagresseurs du cacaoyer : la moniliose au Costa Rica, la pourriture brune et les mirides au Cameroun. ED SIBAGHE. AgroParisTech. France. Encadrante principale : M A Ngo Bieng ; Co-direction : Christian Cilas, DR, UR Bioagresseurs, Cirad ; Jacques Wery, DR, SupAgro.

Participation à comités et jury de thèse

2022-2025. Juan Fernandez-Manjarres. Téléconnexions, productivité écosystémique et variabilité climatique dans les zones d'agroforesterie de l'Amérique Equatoriale. ED ABIES. AgroParisTech. Membre du comité de thèse et Référente ED.

2021-2023. Ndèye Sokhna Dieng. L'action publique agroenvironnementale dans le contexte des engagements zéro déforestation : cas de la Côte d'Ivoire. ED ABIES. AgroParisTech. Membre du comité de thèse et Référente ED.

2017-2019. Claudia ORDOÑEZ. Relation entre (i) structure et composition floristique et (ii) fourniture de services écosystémiques dans des systèmes agroforestiers à base de cacaoyer, région de Huila, Colombie. Universidad Nacional de Colombia. Membre du comité de thèse.

2015-2018. Juan Carlos Suarez Salazar. Comportement écophysiological du cacao au sein de différents arrangements agroforestiers, région de l'Amazonie, Colombie. Thèse en Biologie/écophysologie Cacao, Universidad Nacional, Bogotá, Colombie. Membre du Jury de thèse.

2009-2011. Eunice Ndo. Évaluation des facteurs de risque épidémiologique de la phaeoramulariose des agrumes dans les zones humides du Cameroun. ED SIBAGHE. France. Membre du comité de thèse.

Accueil de chercheurs étrangers et conduite de travaux d'expertise scientifique post-Master

2021. Leslie Morrison Vila. Consultante experte dans le cadre du projet SCAC : collaboration entre observatoires d'écosystèmes forestiers pour la promotion de la gestion durable des forêts comme solution basée sur la nature

2020-2021. Maïri Souza Oliveira. Consultante experte dans le cadre du projet FTA : the CGIAR Research Program on Forests, Trees and Agroforestry

2019. Juan Carlos Suarez Salazar. Organisation spatiale des arbres d'ombrage dans les agroforêts à cacao en Amazonie Colombienne. Universidad de la Amazonia, Columbia

2014. Eunice Ndo. Organisation spatiale des individus cultivés dans les cacaoyères agroforestières du Cameroun et la phaeoramulariose des agrumes. IRAD

Encadrements et formation d'étudiants de niveau Master

2021. Beranyoly Carolina Rodríguez Dubón. Identificación de sitios con oportunidad y prioridad de restauración en el paisaje forestal del Parque Nacional Nombre de Dios, Honduras. Maestría Manejo y Conservación de Bosques Tropicales y Biodiversidad. Escuela de Posgrado CATIE. Membre du comité encadrant.

2020

Leslie Morrison. Caracterización de la dinámica de la biomasa en pie y la productividad de biomasa en bosques tropicales húmedos en el norte de Costa Rica. Maestría Manejo y Conservación de Bosques Tropicales y Biodiversidad. Escuela de Posgrado CATIE. Encadrante principale.

Alba Lorena Hernandez. Dinámica de bosques tropicales en un gradiente altitudinal en la vertiente Caribe de Costa Rica. Maestría Manejo y Conservación de Bosques Tropicales y Biodiversidad. Escuela de Posgrado CATIE. Membre du comité encadrant.

Maria Alejandra Chamorro. Composición y diversidad de especies leñosas de regeneración natural en potreros activos y bosques secundarios en Rivas, Nicaragua. Maestría Manejo y Conservación de Bosques Tropicales y Biodiversidad. Escuela de Posgrado CATIE. Membre du comité encadrant.

Wilson Zúniga Domínguez. Relación vegetación, gradiente altitudinal y efecto de borde en el bosque húmedo de la reserva biológica del Jardín Botánico Lancetilla, Honduras. Maestría Manejo y Conservación de Bosques Tropicales y Biodiversidad. Escuela de Posgrado CATIE. Membre du comité encadrant.

2019. Maïri Souza Oliveira. Biodiversity resilience of tropical production forests in America after logging. Cursus Ingénieur. Master 2 SAADS (Systèmes Agricoles et Agroalimentaires)

Durables au Sud) AgroParistech, spécialité GEEFT (Gestion Environnementale des Écosystèmes et Forêts Tropicales). Encadrante principale.

2017

Elodie Manca. How occurs the natural regeneration of woody species in a sentinel landscape in the Matagalpa region, Nicaragua. Master 2 Botanique et gestion des Ecosystèmes. Université de Montpellier, France. Encadrante principale.

Ethewaldo E. Estrada. Relación de la abundancia de lianas y la regeneración de especies maderables a un gradiente de estacionalidad de la precipitación en bosques tropicales aprovechados. Maestría Manejo y Conservación de Bosques Tropicales y Biodiversidad. Escuela de Posgrado CATIE. Membre du comité encadrant.

2015. Chloé Curtet. Influence de la variation du voisinage sur l'indice d'attaque des bioagresseurs du cacaoyer en systèmes agroforestiers : Cas de la moniliose et de la pourriture brune dans la zone de production d'Upala, au Costa Rica. Ingénieur, ISTOM (Ecole Supérieure d'Agro-Développement International). Encadrante principale.

2013. Quentin Rougelot. Caractérisation de l'influence de l'organisation spatiale et de la composition des strates d'ombrage sur la distribution de la ressource lumineuse dans les Systèmes Agro Forestiers (SAF) complexes : Application aux agroforêts à base de cacaoyers du Cameroun. Master 1. Biodiversité Végétale Tropicale. Université de Montpellier 2. Encadrante principale.

2012. Marie Voisin. Élaboration d'un modèle conceptuel et mathématique de l'interaction entre végétation spontanée et jeunes arbres au sein de plantations forestières. Master 1. Sciences et Technologies du Vivant et de l'Environnement. AgroParisTech. Encadrante principale.

2010. Gidoin Cynthia. Effet des structures spatiales d'une population d'hôte, d'une population d'arbres d'ombrage et des interactions spatiales entre ces deux populations sur l'intensité d'attaque d'un bioagresseur. Application au cas des agroforêts à cacaoyers (*Theobroma cacao*) de la région de Talamanca au Costa Rica et de la moniliose (*Moniliophthora roreri*). Master Écosystèmes. Université de Montpellier. Encadrante principale.

1.4 Activités d'enseignement

L'enseignement n'est pas prépondérant dans mon activité de scientifique, et consiste en des interventions à la demande de responsables de formation, en général de niveau Master. La majorité des interventions a été faite dans le cadre des cours de l'école de « Posgrado » du CATIE (niveau Master), à laquelle je suis professeure associée.

2023. Gestion forestière communautaire comme solution basée sur la nature. Intervention dans le cadre du module « Sylviculture et aménagement des forêts tropicales » du Master GEEFT.

2019

Tropical forest landscape restoration through secondary succession. Master of Science in International Sustainable Tourism (MIST). Escuela de Posgrado CATIE. Turrialba, Costa Rica.

Sistemas Agroforestales como vía de Restauración. Curso Internacional de restauración de Paisajes. Escuela de Posgrado CATIE. Turrialba, Costa Rica.

2017. Modelos de dinámica forestal. Curso internacional sobre manejo sostenible de bosques secundarios. Escuela de Posgrado CATIE. Turrialba, Costa Rica.

2016

Caracterización de la estructura espacial de los individuos en sistemas complejos de cultivos. Aplicación a los sistemas agroforestales con Cacao. Maestría de Agroforestería. Universidad de la Amazonia. Florencia, Caquetá. Colombia.

Caracterización de la estructura espacial de los árboles de sombra en sistemas agroforestales con cacao. Escuela de Posgrado CATIE. Turrialba, Costa Rica.

Optimización de la estructura espacial de los árboles de sombra para la regulación agroecológica de plagas y enfermedades en sistemas agroforestales de cacao. Escuela de Posgrado CATIE. Turrialba, Costa Rica.

2013, 2012 et 2011. Cours en statistiques spatiales : processus ponctuels monovarié et bivarié dans le module : Statistiques spatiales du Mastere SILAT (Systèmes d'informations localisées pour l'aménagement des territoires), AgroParisTech. Montpellier, France.

1.5 Responsabilités scientifiques, académiques et de représentation

Je suis investie dans différentes responsabilités, autant dans le cadre de mon UR que dans le cadre international, et dans le domaine de la recherche forestière tropicale. C'est un axe important pour moi, que je souhaite maintenir et développer. Je pense qu'il faut personnellement s'investir pour accéder aux changements que l'on souhaite voir émerger.

➤ UR F&S Cirad

2023-2024. Membre du comité de direction

- International Union of Forest Research organizations (IUFRO)

2022-2024. Représentante adjointe/alternative du Costa Rica auprès du conseil international
Depuis 2022. Coordinatrice adjointe du groupe de recherche en sylviculture tropicale et subtropicale

- Initiative 20*20 : Initiative régionale de restauration des terres dégradées en Amérique latine et Caraïbes.

Depuis 2021. Point focal du Cirad

Depuis 2021. Membre du groupe de travail Biodiversité

- Global Partnership on Forest and Landscape Restoration (GPFLR)

Depuis 2022. Point focal Cirad pour l'e-secretariat

- Service diplomatique de France au Guatemala

Depuis 2022, en représentation du Cirad au Guatemala

- Édition et révisions scientifiques

Depuis 2022. Membre du comité éditorial de la revue scientifique Forest Ecology and Management

Guest Editor de la Special Issue "Active restoration of timber production and other ecosystem services in secondary and degraded forests", sortie en début 2022

Reviewer pour revues scientifiques : Forest Ecology & Management ; Annals of Forest Science ; Resource, Conservation and Recycling Advances, Restoration Ecology, etc.

1.6 Financements des projets de recherche

La génération de ressources est un aspect prioritaire de la recherche au Cirad (et au CATIE, partenaire centro-américain du Cirad où je suis expatriée depuis 8 ans). Depuis mon entrée au Cirad en juin 2008, j'ai été impliquée dans une trentaine d'initiatives de réponses à appels à projets, et j'ai participé à la construction, à la rédaction ou à l'implémentation d'une vingtaine de projets ou programmes scientifiques sur mes thématiques de recherche, dont deux sont en cours de montage sous ma coordination. Cette importante activité de rédaction de projets est clé et participe à mon insertion dans un important réseau de scientifiques et d'institutions impliquées dans la recherche sur la gestion durable des ressources naturelles en général, et de la ressource forestière en particulier : exemple d'organismes français (INRAe, IRD) et internationaux (WRI, ICRAF/CIFOR, RFA, ONFI, WUR, NEPAD, etc.). Cela me permet d'envisager avec sérénité les constructions de consortiums et leurs interactions dans le cadre des actions de recherche actuelles et futures. Ci-dessous figurent les projets en cours et achevés dans lesquels j'ai été impliquée. J'ai un rôle de coordination de projet ou d'actions de projet dans les 5 plus récents projets (en construction, en cours, et les deux premiers projets achevés).

Projets soumis et en construction

- Forest and Community Initiative de la Fondation Albert 2 de Monaco : « Community Forests in Petén Guatemala: Outscaling and Sharing Knowledge », a été retenu pour la seconde phase du call; la proposition complète a été soumise le 10 février 2023. Leader : Cirad, autres membres internationaux : CATIE, CEMCA

- Projet FFEM - ConForMa : Vers une gestion Concertée Forestière du futur : exemple de la Selva Maya et des communautés forestières du Petén au Guatemala. NOP soutenue par le MTECT, NIP en construction pour évaluation octobre/novembre 2023. Leader : Cirad ; autres membres internationaux : CATIE, CEMCA, RFA, ATIBT, FCCF

Projets en cours

Depuis 2022 - Climate Rush : Climate Rush on Tropical Forest. AI INPP et Soutiens ponctuels Agropolis pour développement d'un jeu de société qui vise à alerter la communauté humaine à l'extrême vulnérabilité climatiques des forêts tropicales. Leader : Cirad

Projets achevés

2021. SCAC programme (Service de coopération et d'action culturelle, Amérique centrale). Renforcement de la collaboration entre observatoires centraméricains d'écosystèmes forestiers et le réseau international Tropical managed Forest Observatory (TmFO) pour la promotion de la gestion durable des forêts comme solution basée sur la nature". Leader : Cirad ; autres membres internationaux : CATIE , TmFO

2011-2021. CGIAR Research Program on Forests, Trees and Agroforestry (FTA). Forest restoration in Costa Rica and Nicaragua: sustainable wood production, climate mitigation, biodiversity recovery and Ecosystem-based Adaptation. Leader : CIFOR - ICRAF, autres membres internationaux : Cirad, CATIE, CIAT- Bioversity, IUFRO, etc.

2018-2021. Projet CATIE-NIFOS. Socioecological restoration of forests, landscapes and ecosystem services resilient to climate change. Leader: CATIE ; autres membres internationaux : NIFOS (The (Korean) National Institute for Forest Science)

2018-2020. Projet KIC FORLAND- Restoration. Development of a decision support platform and related service package to elaborate restoration action plans at the landscape level. Leader : ONFi ; autres membres internationaux : Cirad, ETH Zurich

2017-2018. AI PROPIS CIRAD AGRIFORLAC. Multi-functional agriculture, agroforestry, forestry and sylvo-pastoralism for sustainable, resilient and climate-smart landscapes in Latin America and the Caribbean. Leader : Cirad ; autres membres internationaux : CIFOR - Icrac CATIE, CIAT- Bioversity, etc.

2016-2018. Projet Agropolis fondation Forecast. Forêts et intensification écologique des systèmes agricoles. Leader : Cirad ; autres membres internationaux : CIFOR - Icrac CATIE, SupAgro, IRD, etc.

2012-2015. Projet ATP SAFSE. Recherche de compromis entre productions et services écosystémiques fournis par les systèmes agroforestiers tropicaux. Leader : Cirad ; autres membres internationaux : IRD, INRAe, SupAgro, etc.

2011-2015. Projet ANR Intens&Fix. Intensification écologique des écosystèmes de plantations forestières. Modélisation biophysique et évaluation socio-économique de l'association d'espèces fixatrices d'azote. Leader : Cirad ; autres membres internationaux : IRD, INRAe, SupAgro, etc.

1.7 Publications et communications scientifiques

Articles publiés dans les revues à facteur d'impact

Je suis auteure et co-auteure de 22 publications scientifiques listées ci-dessous. Les co-auteurs en surbrillance sont des collègues et étudiants que j'ai co-encadrés ou co-dirigés.

1- A common framework to model recovery in disturbed tropical forests. Maurent E., Herault B., Pioniot C., Derroire G., Delgado D., Finegan B., Aubry Kientz M., Amani B. H. K., Ngo Bieng M.A. 2023. Ecological Modelling, 483:110418, 12 p. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110418>

2- An assessment of silvopastoral systems condition and their capacity to generate ecosystem services in the Colombian Amazon, Ecosystems and People. Álvarez F., Casanoves F., Suarez Salazar J. C., Rusch G. M., Ngo Bieng M.A. 2023, 9:1, 2213784, <https://doi.org/10.1080/26395916.2023.2213784>

3- Ngo Bieng M.A., Delgado-Rodríguez D., Vilchez-Mendoza S., López-Sampson A., García, Sepúlveda N., Somarriba E. 2022. Tree diversity in a tropical agricultural-forest mosaic landscape in Honduras. Scientific Reports 12, 18544. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21280-7>

4- Ngo Bieng M. A., Finegan B., Sist P. 2022. Active restoration of secondary and degraded forests in the context of the UN Decade on Ecosystem Restoration, Forest Ecology and Management, 503: 119770. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119770>

5- Ngo Bieng M. A., Souza Oliveira M., Roda J-M., Boissière M., Herault B., Guizol P., Villalobos R., Sist P. 2021. Relevance of secondary tropical forest for landscape restoration. Forest Ecology and Management, 493. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119265>.

6- Hernández Gordillo, A. L., Vilchez Mendoza, S., Ngo Bieng, M. A., Delgado, D., and Finegan, B. 2021. Altitude and community traits explain rain forest stand dynamics over a 2370-m altitudinal gradient in Costa Rica. Ecosphere 12 (12): e03867. 10.1002/ecs2.3867.6

- 7- Souza Oliveira M., Finegan B., Casanoves F., Delgado D., Sepulveda N., Aguilar Porras A., Chamorro M.A., Morales Aymerich J. P., Ngo Bieng M. A. 2021. Biomass of timber species in Central American secondary forests: Towards climate change mitigation through sustainable timber harvesting. *Forest Ecology and Management*, 496: 119439. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119439>.
- 8- Morrison Vila L., Ménager M., Finegan B., Delgado D., Casanoves F., Aguilar Salas L. Á., Castillo M., Hernández Sánchez L. G., Méndez Y., Sánchez Toruño H., Solano G., Zúñiga Mora P., Ngo Bieng M. A. 2021. Above-ground biomass storage potential in primary rain forests managed for timber production in Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, Volume 497: 119462. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119462>.
- 9- Rodríguez Suarez L., Suarez Salazar J. C., Casanoves F. Ngo Bieng M. A. 2021. Cacao agroforestry systems improve soil fertility: Comparison of soil properties between forest, cacao agroforestry systems, and pasture in the Colombian Amazon. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 314 (2021) 107349. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107349>
- 10- Suárez Salazar J. C., Fernando C., Ngo Bieng M. A., Melgarejo L. M., Di Rienzo J. A., Armas C. 2021. Prediction model for sap flow in cacao trees under different radiation intensities in the western Colombian Amazon. *Scientific Reports*. Vol. 11: 10512. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89876-z>.
- 11- Ndoungué Djeumekop M. Ngo Bieng M.A., Ribeyre F., Bonnot F., Cilas C, Neema C and Ten Hoopen G. M. 2021. Spatial and Temporal Analysis of *Phytophthora megakarya* Epidemic in Newly Established Cacao Plantations. *Plant Disease*. <https://doi.org/10.1094/PDIS-09-19-2024-RE>.
- 12- Veintimilla D., Ngo Bieng M.A., Delgado D., Vilchez Mendoza S.J., Zamora N., Finegan B. 2019. Drivers of tropical rain forest composition and alpha-diversity patterns over a 2520 m altitudinal gradient. *Ecology and Evolution*, 9 (10): p. 5720-5730. <https://doi.org/10.1002/ece3.5155>.
- 13- Akoutou Mvondo E., Ndo E.G.D., Ngo Bieng M.A., Ambang Z., Bella Manga, Cilas C., Tsouga Manga M.L., Bidzanga Nomo L. 2019. Assessment of the interaction between the spatial organization of citrus trees populations in cocoa agroforests and *Phytophthora* foot rot disease of citrus severity. *AgroForestry Systems*, 93 (2): p. 493-502. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0140-3>.
- 14- Suárez Salazar J.C., Ngo Bieng M.A., Melgarejo L.M., Di Rienzo J.A., Casanoves F. 2018. First typology of cacao (*Theobroma cacao* L.) systems in Colombian Amazonia, based on tree species richness, canopy structure and light availability. *PloS One*, **13** (2): 20 p.
- 15- Ngo Bieng M.A., Alem L., Curtet C., Tixier P. 2017. Tree spacing impacts the individual incidence of *Moniliophthora roreri* disease in cacao agroforests. *Pest Management Science*, **73** (11): p. 2386-2392.

- 16- Gidoïn C., Babin R., Bagny-Beilhe L., Cilas C., Ten Hoopen G.M., Ngo Bieng M.A. 2014. Tree spatial structure, host composition and resource availability influence mirid density or Black pod prevalence in cacao agroforests in Cameroon. *PLoS One*, **9** (10): 12 p.
- 17- Gidoïn C., Avelino J., Deheuvels O., Cilas C., Ngo Bieng M.A. 2014. Shade tree spatial structure and pod production explain frosty pod rot intensity in cacao agroforests, Costa Rica. *Phytopathology*, **104** (3): p. 275-281.
- 18- Ngo Bieng M.A., Gidoïn C., Avelino J., Cilas C., Deheuvels O., Wery J. 2013b. Diversity and spatial clustering of shade trees affect cacao yield and pathogen pressure in Costa Rican agroforests. *Basic and Applied Ecology*, **14** (4): p. 329-336.
- 19- Ngo Bieng M.A., Perot T., De Coligny F., Goreaud F. 2013a. Spatial pattern of trees influences species productivity in a mature oak-pine mixed forest. *European Journal of Forest Research*, **132** (5-6): p. 841-850.
- 20- Oro Z.F., Bonnot F., Ngo Bieng M.A., Delaitre E., Dufour B.P., Ametefe K.E., Mississo E., Wegbe K., Muller E., Cilas C. 2012. Spatiotemporal pattern analysis of *Cacao swollen shoot virus* in experimental plots in Togo. *Plant Pathology*, **61** (6): p. 1043-1051.
- 21- Ngo Bieng M.A., Molino J.F., Goreaud F. 2011. Point process models for mixed sessile forest stands. *Annals of Forest Science*, **68** (2): p. 267-274.
- 22- Ngo Bieng M.A., Ginisty C., Goreaud F., Perot T. 2006. First typology of oak and Scots pine mixed stands in Orléans Forest (France), based on the canopy spatial structure. *New Zealand journal of forestry science*, **36** (2-3): p. 325-346

Autres communications

- Je suis auteure et co-auteure de trois articles publiés dans les revues à comité de lecture, sans facteur d'impact, ainsi que de trois chapitres d'ouvrages.

Articles publiés dans les revues à comité de lecture, sans facteur d'impact

Morrison, L; Maurent, E; Finegan, B; Delgado-Rodríguez, D; Casanoves, F; Ngo Bieng, MA. 2022. Recuperación de la biodiversidad en bosques neotropicales primarios y perturbados de Costa Rica. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 40 p. Serie técnica. Informe técnico / CATIE, no. 437. ISBN 978-9977-57-769-2. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/11748>

Delgado-Rodríguez, D; Ngo Bieng, M. A; Vilchez-Mendoza, S; López-Sampson, A; García, E; Sepúlveda, N; Somarriba, E. 2021. Potencial de conservación de la biodiversidad de bosques y árboles en fincas del paisaje ganadero Catacamas, Honduras. Serie técnica. Informe técnico / CATIE; no. 433. ISBN 978-9977-57-765-4. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 43 p.

Goreaud F., Allain R., Gourbaud B., Ngo Bieng M.A., Perot T., Piroche J.N. 2007. Simuler des peuplements de structures variées pour faciliter l'utilisation des modèles « arbre » spatialisés. *Revue Forestière Française*, 59 (2) : p. 137-161.

Chapitres/co-rédaction d'ouvrages

« Vivre avec les forêts tropicales ». Edition Muséo. 216 pages. Plinio Sist, Charles Doumenge, Valéry Gond, Plinio Sist, Jacques Tassin, Jean-François Trébuchon (eds)

Ngo Bieng M.A., Gidoïn, C., Ten Hoopen M. 2019. Structures spatiales et régulation des bioagresseurs des agroforêts à cacaoyers au Cameroun et au Costa Rica. In : Agroforesterie et services écosystémiques en zone tropicale : Recherche de compromis entre services d’approvisionnement et autres services écosystémiques. Seghieri Josiane (ed.), Harmand Jean-Michel (ed.). Versailles : Ed Quae, 109-119. (Update Sciences & technologies) ISBN 978-2-7592-3059-4

Bagny Beilhe, L., Allinne, C., Avelino, J., Babin, R., Brévault, T., Gidoïn, C., Ngo Bieng, M-A, Motisi, N, Soti, V., ten Hoopen, G. M. 2019. Régulation des bioagresseurs des cultures dans les systèmes agroforestiers tropicaux, revue des approches. In : Agroforesterie et services écosystémiques en zone tropicale : Recherche de compromis entre services d’approvisionnement et autres services écosystémiques. Seghieri Josiane (ed.), Harmand Jean-Michel (ed.). Versailles : Ed Quae, 229-242. (Update Sciences & technologies) ISBN 978-2-7592-3059-4

- Je suis auteure et co-auteure de 28 communications dans des conférences et congrès scientifiques internationaux (Cf CV). Certaines conférences congrès sont celles de : IUFRO, ATBC, FTA Conference, Ecological Society of America, World Congress on Agroforestry, etc.
- J’ai été aussi impliquée dans la coordination de symposium, sessions techniques et panels de discussion au sein d’évènements scientifiques internationaux.

Panel: The social compact in the process of restoration, annual meeting of the initiative 20*20, May 18-20 2021. Nature-based Solutions for Climate Action. Whova virtual Platform

Chair: Marie Ange Ngo Bieng, CIRAD/CATIE

Participants: Rafael Obregon, secretaria del ambiente ciudad de México; Stephany Pérez Noé, Fondo para la paz; Paula Caballero, RARE; Ernesto Herrera, Reforestamos México; Elena Florian, CATIE; Florence Reed, Sustainable Harvest International.

Panel: Landscape governance for restoration actions in the Amazon, annual meeting of the initiative 20*20, June 2019. Buenos Aires, Argentine.

Chair: Marie-Ange Ngo Bieng, CIRAD/CATIE

Participants : Jacqueline de Carvalho Peçanha, Paragominas Municipality, Brazil; Estelle Dugachard, and Joanna Montesinos, ONF Brazil, Jacinto Farias, Secretary of Agricultural and Environmental Policy, STTR

Interactive session: No one left behind: landscape governance in Latin America and the Caribbean. GLF Bonn, June 2019

Chair: Marie Ange Ngo Bieng.

Participants : Martha Julia Tax Sapon, Helvetas ; Bryan Finegan, CATIE ; Plinio Sist , Cirad ; Sean DeWitt, WRI; Leander Raes, IUCN; Cora van Oosten, WUR; Sara Scherr. Ecoagriculture Partners.

<https://www.globallandscapesforum.org/presentation/no-one-left-behind-landscape-governance-in-latin-america-and-the-caribbean>

Technical session: Will active restoration of Secondary and Degraded Forests (SDFs) help to address sustainably the gap between wood demand and supply? IUFRO World Congress, Sept-Oct 2019, Curitiba, Brazil.

Chairs: Dr Ngo Bieng M. Ange, Dr Plinio Sist

article IUFRO Spotlight: <https://www.iufro.org/publications/iufro-spotlights/article/2019/06/11/congress-spotlight-67-tapping-the-potential-of-restoring-disturbed-tropical-forests/>

Session orale : <https://app.oxfordabstracts.com/events/691/program-app/session/6239>

Session poster : <https://app.oxfordabstracts.com/events/691/program-app/session/8239>

1.8 Interventions dans les médias et vulgarisation scientifique

Je suis convaincue qu'une communication efficace des résultats scientifiques au grand public, i.e. à travers des médias publics, peut en améliorer l'impact sur la société. Je me suis donc impliquée récemment dans ce cadre, notamment dans la promotion du livre de l'UR F&S « Vivre avec les forêts tropicales ». Je souhaiterai dans le futur m'impliquer un peu plus des actions de communication au grand public, dans des sujets cohérents avec mes compétences (vulnérabilité et résilience des forêts tropicales, maintien durable des services écosystémiques dans les forêts tropicales perturbées, etc.). Cette orientation est à la base du développement du jeu Climate Rush, dans le cadre de la fête de la science 2022, dont le thème était le changement climatique (voir figure 22).

Communication pour le One Forest Summit, 2023 : les forêts tropicales et les populations qui en dépendent. https://re.linkedin.com/posts/cirad_marie-ange-ngo-bieng-ecologist-cirad-activity-7035527771023904769-0aJ5

Osez les Sciences, 2023. Assemblée Nationale. [Ouverture de l'événement « Osez les sciences » - Présidence de l'Assemblée nationale \(assemblee-nationale.fr\)](https://www.assemblee-nationale.fr/la-presidence/actualites/2023/05/ouverture-de-l-evenement-osez-les-sciences)

Fête de la science, 2022. Démonstration Climate Rush : jeu de société qui vise à alerter le public à l'extrême vulnérabilité climatiques des forêts tropicales.

<https://www.fetedelascience.fr/les-arbres-et-les-forets-tropicales-face-au-changement-climatique-comment-resister-comment-s>

La Méthode scientifique, 2022 Reforestation : les racines du bien ? Marie Ange Ngo Bieng, Julie Aleman.

<https://www.franceculture.fr/emissions/la-methode-scientifique/reforestation>

Table ronde «Los bosques tropicales tienen un futuro? El modelo de las concesiones comunitarias del Petén». En el marco de la noche de ideas 2022.

Organisation : Alliance Française au Guatemala, CEMCA, Cirad, CATIE.

Chair: Marie-Ange Ngo Bieng, CIRAD/CATIE

Participants: Rita Mishaan, embajadora en el medio ambiente y cambio climático, Guatemala.

Plinio Sist (director del equipo Bosques y sociedades, CIRAD), Ricardo Rapallo (Representante FAO Guatemala), Julio Lopez (Representante CATIE Guatemala).

<https://www.cepam.cnrs.fr/actualite/conference-noche-de-las-ideas/>

Pour la Science, 2021. Pour une reforestation raisonnée. Élise Buisson, Marie Ange Ngo Bieng et Thierry Gauquelin. <https://www.pourlascience.fr/sd/environnement/pour-une-reforestation-raisonnee-22521.php>

Good Planet, 2021. Marie Ange Ngo Bieng, écologue forestière, nous parle de la restauration des forêts tropicales. <https://www.goodplanet.info/2021/06/01/marie-ange-ngo-bieng-ecologue-forestiere-nous-parle-de-la-restauration-des-forets-tropicales/>

La terre au carré, 2021. Vivre avec les forêts tropicales. Plinio Sist, Marie Ange Ngo Bieng, Patrick Blanc. <https://www.franceinter.fr/emissions/la-terre-au-carre/la-terre-au-carre-du-jeudi-01-juillet-2021>

Autour de la question, 2021. Comment vivre avec les forêts tropicales ? Plinio Sist, Marie Ange Ngo Bieng. <https://www.rfi.fr/fr/podcasts/autour-de-la-question/20210607-comment-vivre-avec-les-for%C3%AAs-tropicales>

2 Résumé de mon parcours de recherche

Je suis chercheuse en Ecologie appliquée aux systèmes forestiers hétérogènes. Je définis dans mes travaux de recherche un système forestier hétérogène comme un peuplement forestier présentant un mélange d'espèces et/ou une irrégularité en âge ou en taille. J'ai travaillé depuis ma thèse sur un gradient croissant d'hétérogénéité, avec l'objectif de comprendre et de représenter les interactions entre individus (arbres) au sein de ces systèmes hétérogènes, de comprendre les mécanismes à la base de leur coexistence, et de proposer une orientation vers des règles de gestion cohérentes pour le maintien de cette hétérogénéité.

Mon étude de la coexistence spécifique a eu pour base l'analyse de la structure spatiale des individus (arbres) dans un peuplement donné (figure 2). La structure spatiale d'un peuplement forestier représente l'organisation des arbres dans l'espace. Cette organisation spatiale est un concept fondamental largement utilisé en écologie des communautés pour étudier et comprendre les interactions écologiques entre individus, à l'exemple de la Janzen–Connell theory expliquant la diversité des forêts tropicales (Batista and Maguire, 1998). La structure spatiale décrit les relations de voisinage et prend en compte les relations spatiales entre les individus, mais aussi leurs dimensions. Elle détermine ainsi les conditions de croissance et de dynamique autour de chacun des arbres d'un peuplement forestier (Goreaud, 2000). Elle détermine en particulier l'environnement local qui modifie l'expression des processus naturels comme la croissance, la mortalité et la régénération du peuplement. Réciproquement, ces processus naturels modifient à leur tour la structure spatiale, qui peut aussi être influencée par des actions anthropiques (Ngo Bieng, 2007). La structure spatiale rend compte de la diversité des environnements caractérisant les peuplements hétérogènes, et influence les conditions de dynamique individuelle. Ces conditions de dynamique individuelle, qui sont le résultat entre autres de processus de compétition ou de facilitation locales, d'hétérogénéité de partage des ressources, etc., déterminent les performances individuelles, et par conséquent les performances de l'ensemble du système.

L'analyse de la structure spatiale d'un peuplement forestier apparaît alors comme une piste intéressante pour la caractérisation de peuplements hétérogènes. Plusieurs travaux montrent de quelle manière l'analyse de la structure spatiale est utile pour la description des peuplements forestiers, mais aussi donnent des pistes pour l'étude de leur dynamique. Ces travaux illustrent comment une structure spatiale observée peut rendre compte des différents processus naturels et anthropiques à l'origine de la dynamique de l'écosystème (Goreaud *et al.*, 2002; Genet *et al.*, 2014; Picard, 2021).

Dans le cadre de mes travaux de recherche et pour comprendre le fonctionnement des systèmes étudiés, j'ai utilisé les analyses de structure spatiale de systèmes forestiers hétérogènes pour des questions de : (i) description du pattern à l'origine d'une répartition spatiale d'un groupe d'individus ; (ii) caractérisation et modélisation de l'interaction entre une configuration spatiale et des performances du système ; (iii) modélisation de structure spatiale, avec l'objectif de reproduire par simulation des arrangements spatiaux réalistes, et spécifiquement les arrangements corrélés à des performances intéressantes des systèmes étudiés (figure 2).

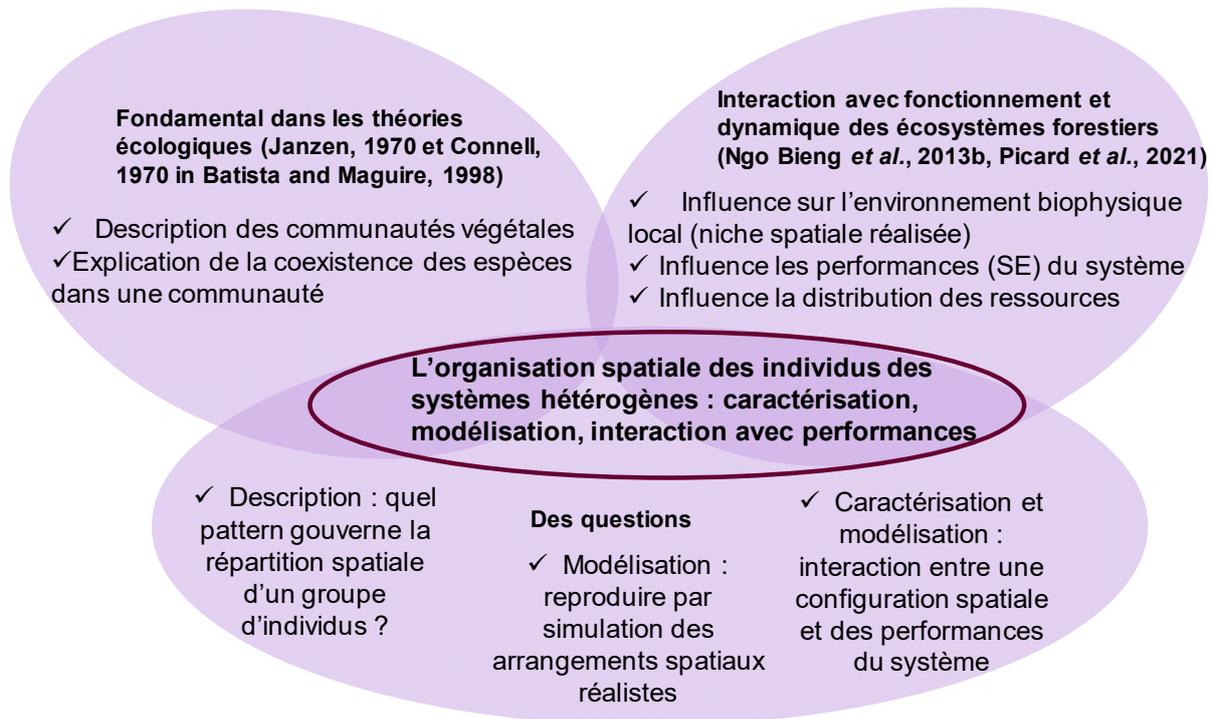


Figure 2 : Schématisation de la place centrale de l'analyse des structures spatiales des individus (arbres) dans un peuplement dans mes problématiques de recherche

Les patterns spatiaux influant sur l'expression des processus naturels, mes travaux de recherche permettent aussi d'interpréter l'impact des interactions spatiales sur les processus écologiques naturels déterminant l'expression de différents services écosystémiques. Les résultats de mes travaux de recherche et leur interprétation contribuent alors à donner des pistes pour envisager des interventions humaines qui participent à moduler les patterns spatiaux dans des systèmes anthropisés et gérés, pour influencer la réalisation de différents processus écologiques, qui à leur tour pourront impacter les performances de systèmes et produire une diversité de services écosystémiques. L'objectif appliqué de mes recherches telles que présentées dans la partie « projet de recherche » sera alors de stimuler la récupération de la biodiversité et des services écosystémiques dans les systèmes forestiers dégradés, cela par des actions de mise en évidence de patterns spatiaux « optimisés » pour un service environnemental donné, ou alors d'optimisation de la structure spatiale des individus.

Avec cet objectif appliqué comme fil conducteur, ce document s'organise alors autour de trois éléments principaux qui synthétisent mes travaux de recherche (figure 3) : (i) la caractérisation et la modélisation des structures spatiales au sein de peuplements forestiers plurispécifiques (ma thèse en collaboration avec le Cemagref de Nogent-sur-Vernisson) ; (ii) les interactions entre structure du peuplement et une diversité de performances (et services écosystémiques associés) au sein de systèmes forestiers et agroforestiers tropicaux complexes (spécifiquement la régulation des bioagresseurs ; premier poste au Cirad, UMR SYSTEM, actuellement UMR AbSys) ; (iii) une ingénierie écologique visant à améliorer le potentiel de récupération de la biodiversité et des services écosystémiques dans des systèmes forestiers tropicaux intacts et perturbés par modulation de la composition et de la structure du peuplement, en interaction avec différents facteurs environnementaux, y compris anthropiques (mon poste actuel et mon projet au sein de l'UR F&S).

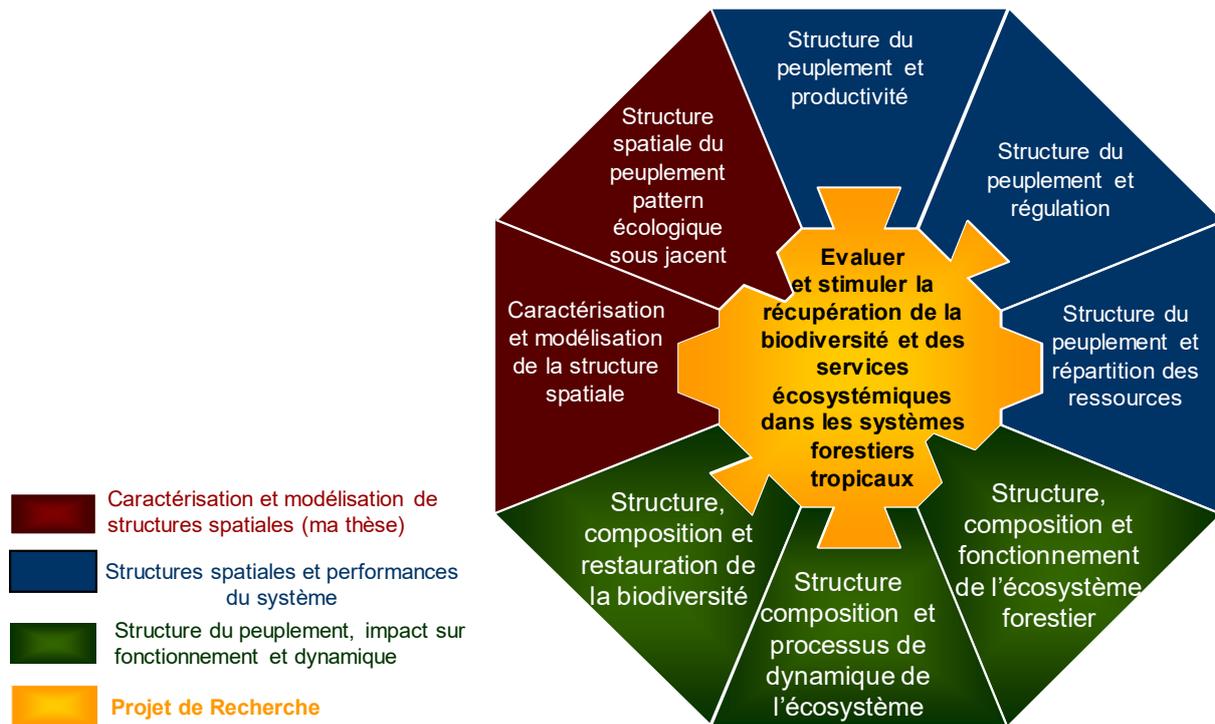


Figure 3 : Illustration schématique de la complémentarité entre mes actions de recherche passées et en cours, avec mon projet de recherche au centre

2.1 Interactions spatiales entre différentes espèces au sein de peuplements forestiers plurispécifiques

Ce travail dont les premiers développements et résultats ont été effectués dans le cadre de ma thèse au Cemagref (Ngo Bieng, 2007), a été poursuivi pendant les premières années de mes recherches au Cirad (Ngo Bieng *et al.*, 2013b). En plus d'améliorer ma compréhension des bases de la coexistence spatiale entre différentes espèces au sein de peuplements forestiers plurispécifiques étudiés, l'objectif était d'aller plus loin dans la compréhension et la modélisation de l'interaction entre patterns spatiaux et propriétés émergentes ou performances du système étudié. Cet objectif a été appliqué aux peuplements mélangés chêne - pin la forêt domaniale d'Orléans, et à une performance précise de ces peuplements : leur productivité dans différentes configurations spatiales. La caractérisation de l'interaction entre patterns spatiaux et propriétés émergentes ou performances du système hétérogènes a impliqué une première phase de caractérisation de la diversité patterns qui gouvernent la répartition spatiale des individus arbres dans les peuplements étudiés.

2.1.1 Identification de patterns qui gouvernent la répartition spatiale d'un groupe d'individus arbre dans un peuplement donné

Dans Ngo Bieng *et al.* (2006), j'ai présenté une typologie de structure spatiale des peuplements mélangés chêne - pin de la forêt d'Orléans. Cette typologie qui est le résultat de mon travail de thèse, a été construite à partir de structures spatiales de dispositifs installés en forêt d'Orléans, choisis pour illustrer la variabilité existante.

Pour construire cette typologie de structure spatiale, j'ai utilisé le formalisme des processus ponctuels. Il s'agit d'outils mathématiques pertinents pour analyser la structure d'un ensemble de points (Ngo Bieng *et al.*, 2011). Un processus ponctuel (spatial) est un modèle stochastique qui gouverne la localisation des événements sur une surface donnée (Cressie, 1993). Les processus ponctuels sont

généralement utilisés pour analyser la structure spatiale des arbres dans les peuplements forestiers. La position des arbres (et leur type : espèces, strates, groupes fonctionnels, etc.) dans la parcelle est en réalité le processus de points à analyser. L'utilisation de ces outils statistiques requièrent une cartographie précise et complète du dispositif à caractériser (i.e. la position de l'ensemble des arbres dans le repère qui est la parcelle). Plus précisément, j'ai utilisé les fonctions $K(r)$ et $L(r)$ de Ripley qui sont généralement utilisées dans les études écologiques (Goreaud, 2000; Ngo Bieng, 2007), et sont des outils d'analyse de processus ponctuels permettant une description de la structure spatiale à plusieurs échelles simultanément.

La fonction de Ripley univariée caractérise la structure spatiale d'un semis de points ou d'un ensemble de points du même type : même espèce, même cohorte, etc. Elle met en évidence des structures spatiales aléatoire, agrégée ou régulière. La fonction de Ripley bivariée ou intertype (Lotwick and Silverman, 1982; Goreaud and Pélissier, 2003) caractérise la structure du mélange, i.e. l'interaction spatiale entre deux semis de points de types différents dans la même surface d'étude. Cette fonction intertype permet alors d'avoir accès à la niche spatiale spécifique (élément clé de compréhension de la biodiversité et de la coexistence multi-spécifique), et met en évidence des structures spatiales d'attraction, d'indépendance ou de répulsion intertype.

La typologie de structure spatiale des peuplements mélangés chêne-pin de la forêt d'Orléans a ainsi été construite sur la base d'une classification ascendante hiérarchique robuste des valeurs des fonctions de Ripley et intertype de chacun des dispositifs étudiés (Ngo Bieng *et al.*, 2006). Pour les arbres de la canopée, la typologie met en évidence un gradient dans les structures spécifiques (plus ou moins agrégées) et intertype (de la répulsion forte à l'indépendance). Les types de mélanges identifiés, qui correspondent à des dispositifs aux structures spatiales différentes mettent en conséquence en évidence un gradient dans « l'intimité du mélange », depuis le mélange d'agrégats monospécifiques (figure 4.a) et un mélange « pied à pied » ou intime (figure 4.b).

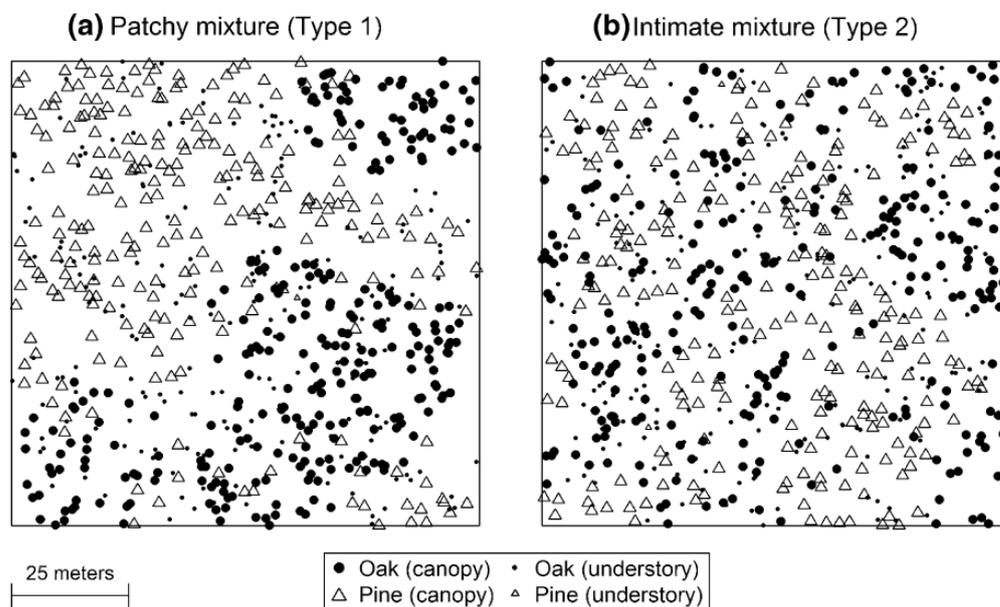


Figure 4 : Illustration de deux types de structure spatiale, mélange d'agrégats monospécifiques et mélange « pied à pied » ou intime (Ngo Bieng *et al.*, 2013b)

Une telle typologie de structure spatiale, en plus de fournir une description basée sur une mesure assez complète de la complexité structurale des peuplements étudiés, permet également : (i) une comparaison entre la diversité de patterns observés pour un même type de peuplement ; (ii) la construction de modèles de structure spatiale pour les différents types spatiaux identifiés qui

permettent de reproduire par simulation des états initiaux réalistes par la répartition spatiale des communautés végétales (forestières) (Ngo Bieng *et al.*, 2011), (iii) une interprétation des différents arrangements spatiaux observés en terme de processus écologiques sous-jacents permettant d'expliquer la coexistence des espèces en mélange, ce qui est un objectif central en écologie.

Dans ce dernier cadre principalement, même si la forêt d'Orléans est une forêt gérée dont les structures spatiales de peuplements mélangés ont été créées et modulées par l'homme, différents éléments de la dynamique de ces systèmes permettent de mettre en évidence différents processus cohérents avec la théorie de la niche écologique (Hutchinson, 1957; Alley, 1982; Holt, 2009) : il existe un ensemble de facteurs écologiques (et anthropiques) qui déterminent la coexistence de ces deux espèces dans les parcelles étudiées, par le biais des organisations spatiales. La théorie de la niche écologique gouverne d'avantage l'organisation et l'évolution de communautés naturelles, et moins des communautés artificielles. Dans notre cas, nous essayons en fait de comprendre les conditions d'organisation spatiale qui conduisent à des niches réalisées, favorables à la coexistence des deux espèces en mélange dans les parcelles étudiées. Il s'agit d'interpréter l'ensemble des conditions particulières du milieu qui permettent à nos individus de cohabiter dans les parcelles étudiées i.e. fournissant les conditions environnementales nécessaires au maintien des individus de chacune des espèces, dans un espace impacté par la compétition pour les ressources du milieu des individus et des espèces en mélange.

Grace aux analyses de structures spatiales de ces peuplements hétérogènes, j'ai mis en évidence pour les peuplements étudiés la non neutralité, ou encore le caractère non aléatoire de la coexistence de ces deux espèces en mélange au sein des peuplements étudiés.

En effet, les outils que j'ai utilisés pour caractériser la structure spatiale des peuplements constituent de manière intrinsèque un test du caractère neutre ou non neutre de la présence et de l'organisation spatiale des individus en mélange. $\lambda * K(r)$ est définie comme l'espérance du nombre de voisins à une distance inférieure ou égale à r d'un point quelconque du semis (λ représentant la densité du semis de point, et plus précisément la densité d'une population donnée dans un peuplement). Pour le peuplement étudié, la fonction $K(r)$ de Ripley caractérise la structure du voisinage moyen autour d'un point. On peut ensuite comparer statistiquement cette structure à celle de l'hypothèse nulle de distribution aléatoire des points. Pour réaliser ce test statistique, un intervalle de confiance représentant l'hypothèse nulle est construit selon la méthode de Monte Carlo en simulant un grand nombre de réalisations de distribution aléatoire des points du semis analysé (Goreaud, 2000). Par sa construction, cette hypothèse nulle constitue alors une représentation d'une distribution complètement aléatoire des individus analysés, i.e. comment serait l'organisation spatiale de ces points si leurs positions étaient indépendantes les unes des autres, si la position d'un point ne dépendait en aucun cas de la position d'un autre point, en d'autre terme, si la probabilité d'avoir un individu à une position était la même quel que soit l'individu considéré, et ne variait qu'en fonction de la surface analysée. Pour une distribution aléatoire ou de Poisson qui sert d'hypothèse nulle, l'espérance du nombre de voisins à une distance r d'un point quelconque est : $\lambda \pi r^2$ (la densité multipliée par la surface d'un disque de rayon r autour d'un point donné). On a ainsi $\lambda K(r) = \lambda \pi r^2$ et donc $K(r) = \pi r^2$. Cette hypothèse nulle basée sur un processus ponctuel aléatoire constitue en quelque sorte une représentation mathématique du modèle neutre de l'assemblage des communautés (Hubbell, 2005).

Ainsi, la fonction de Ripley permet de tester si la structure du voisinage autour d'un point obéit aux caractéristiques d'un processus aléatoire, ou au contraire si des processus non aléatoires, agrégés ou réguliers sont à l'origine de la structure spatiale analysée. Pour un processus agrégé, les points ont en moyenne plus de voisins que sous l'hypothèse nulle ($K(r) > \pi r^2$) et inversement pour un processus régulier, les points ont en moyenne moins de voisins ($K(r) < \pi r^2$).

Pour faciliter l'interprétation de la fonction $K(r)$ (notamment la comparaison avec l'hypothèse nulle) et stabiliser la variance, la fonction $L(r)$ de Besag (Ripley, 1977) qui est une transformation de la fonction $K(r)$ de Ripley est utilisée :

$$L(r) = \sqrt{\frac{K(r)}{\pi}} - r$$

Cette fonction facilite l'interprétation graphique ; en effet, pour un processus de Poisson, à toutes les distances de r , $L(r) = 0$. Les processus agrégés ($L(r) > 0$) et réguliers ($L(r) < 0$) se situent respectivement au-dessus et en dessous de la courbe. Ces différentes situations sont illustrées dans la figure 5.

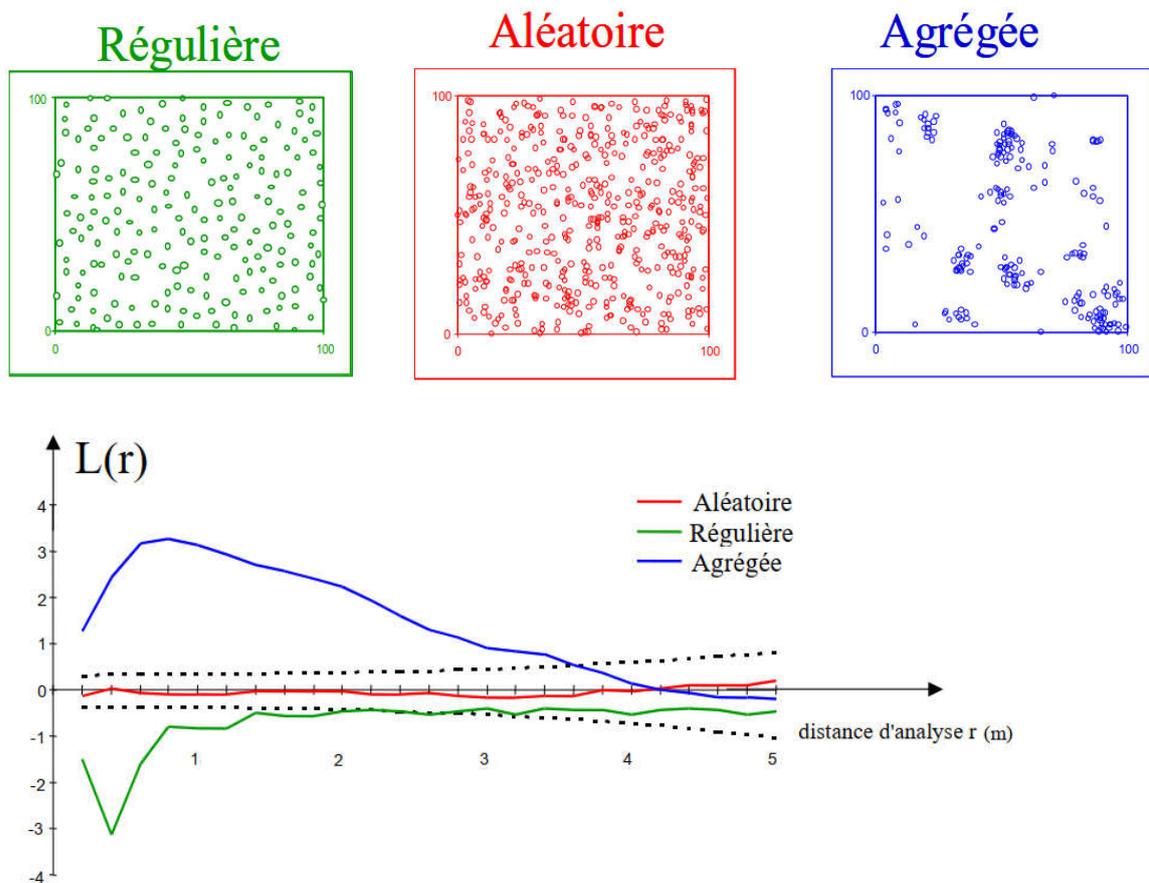


Figure 5 : Illustration de structure spatiale régulière, aléatoire et agrégée, et des courbes de Ripley correspondante (Ngo Bieng, 2007)

Divers éléments de mes résultats d'analyse de structures spatiales donnent alors des éléments de compréhension des processus écologiques (et anthropiques) à la base des différents types de mélange (Ngo Bieng, 2007).

J'ai trouvé de manière récurrente, des structures spécifiques plus ou moins agrégées. Cela correspond bien avec les résultats d'analyse de structures spatiales de peuplements mélangés feuillus - résineux trouvés dans la bibliographie (Ngo Bieng, 2007; Ngo Bieng *et al.*, 2011). Ces structures agrégées peuvent être le résultat d'une régénération localisée dans les peuplements étudiés. En effet la régénération dans ces peuplements, et plus généralement dans les peuplements mélangés résineux-feuillus est grandement dépendante de la quantité de lumière. Cela conduit à la formation d'agrégats dans les trouées. Les structures agrégées peuvent alors être dues à la phase de régénération, les forces

d'agrégation en peuplement adulte étant moindres qu'à l'état juvénile à cause de l'auto-éclaircie lors de la croissance (Moeur, 1997). L'agrégation à différentes échelles peut aussi conduire à deux autres hypothèses : (i) la compétition intraspécifique n'est pas le facteur écologique principal dans la dynamique des peuplements étudiés ; (ii) l'éclaircissement par la gestion n'a pas été très intense. Nous lions ce dernier point au fait qu'il n'existait pas, à l'époque de mon étude, de recommandations sylvicoles claires au niveau du martelage (exploitation) dans ces peuplements. La sylviculture est cependant bien présente dans la régularité à petites distances des pins qui est la conséquence d'une régénération plantée régulièrement.

Concernant la structure interspécifique dans la canopée, très importante pour caractériser le mélange, nous avons trouvé une tendance à la répulsion, significative ou non, et plus rarement une indépendance. J'avais alors fait l'hypothèse que la compétition interspécifique agissait bien dans ces peuplements mélangés, mais suivant différentes forces éventuellement influencées par les distances de plantations lors de l'introduction des pins (Ngo Bieng *et al.*, 2011).

Concernant les structures intertypes entre les chênes de la canopée et ceux du sous-étage, j'ai mis en évidence des tendances non significatives la plupart du temps. Le cas le plus fréquent pour les chênes du sous-étage est la tendance à la répulsion, avec cependant quelques cas d'indépendance intertype. Ces tendances non significatives peuvent être le fait du faible nombre d'individus qui réduit la puissance du test statistique. Ces tendances peuvent aussi être la conséquence d'un grand degré d'ouverture du peuplement, qui entrainerait une régénération possible à plusieurs emplacements dans le peuplement.

Concernant la structure interspécifique entre les pins de la canopée et les chênes du sous-étage, nous avons aussi noté diverses tendances non significatives, mais la tendance majoritaire était l'attraction interspécifique. Ces associations sont dues au fait que les feuillus sont moins exigeants en lumière pendant leur régénération que les résineux (au moins certains). De plus, la régénération de feuillus domine dans les trouées. On s'attend alors à ce qu'un sous-étage de résineux soit rare. Pour ce qui est des dispositifs étudiés, nous observons bien la rareté du sous-étage de pins. Il est présent dans certains des dispositifs cartographiés, mais souvent représenté par un nombre peu important d'individus.

Un autre résultat intéressant de ces analyses est le faible nombre d'individus dans le sous-étage, surtout concernant le pin. Cette faible densité peut être le fait de la forte compétition des fougères et autres herbacées présentes dans certains dispositifs. Cette faible densité dans le sous-étage peut aussi être due à de l'abrutissement des semis par le gibier. Une recommandation claire qui doit alors être faite pour le maintien du mélange est une reforestation en faveur d'un renouvellement de la population de pins. Il apparait en effet que la régénération de pin n'a pas la même probabilité de succès que la régénération de chêne dans les peuplements étudiés.

Ces résultats permettent de souligner le potentiel de ce travail de recherche sur la structure spatiale des peuplements pour l'amélioration des pratiques de gestion forestière, pour une conservation des espèces en mélange. En effet la variabilité existante, i.e. les différents types spatiaux identifiés, induit des pratiques sylvicoles diversifiées. Ces pratiques sylvicoles pouvant modifier la structure, elles doivent se baser sur la diversité de structures existantes, dans le but de mettre en place des actions de conservation et de restauration de la diversité structurelle et spécifique des peuplements.

Dans ce sens, j'ai construit un programme d'analyse et simulation de structure spatiale (PASS) qui permet de simuler différentes combinaisons spatiales à partir d'une diversité de modèles de structure. L'intérêt est alors d'étudier l'influence de la combinaison spatiale de l'état initial (liste, espèces et autres caractéristiques des individus) sur la dynamique et les performances des systèmes étudiés. Ces modèles de structure sont implémentés dans la plateforme de simulation Capsis, où ils sont utilisés pour simuler des états initiaux réalistes pour le module Oak-Pine, modèle de croissance à l'échelle de

l'arbre et spatialement explicite pour les peuplements mélangés chêne-pin (figure 6) (Ngo Bieng *et al.*, 2013b).

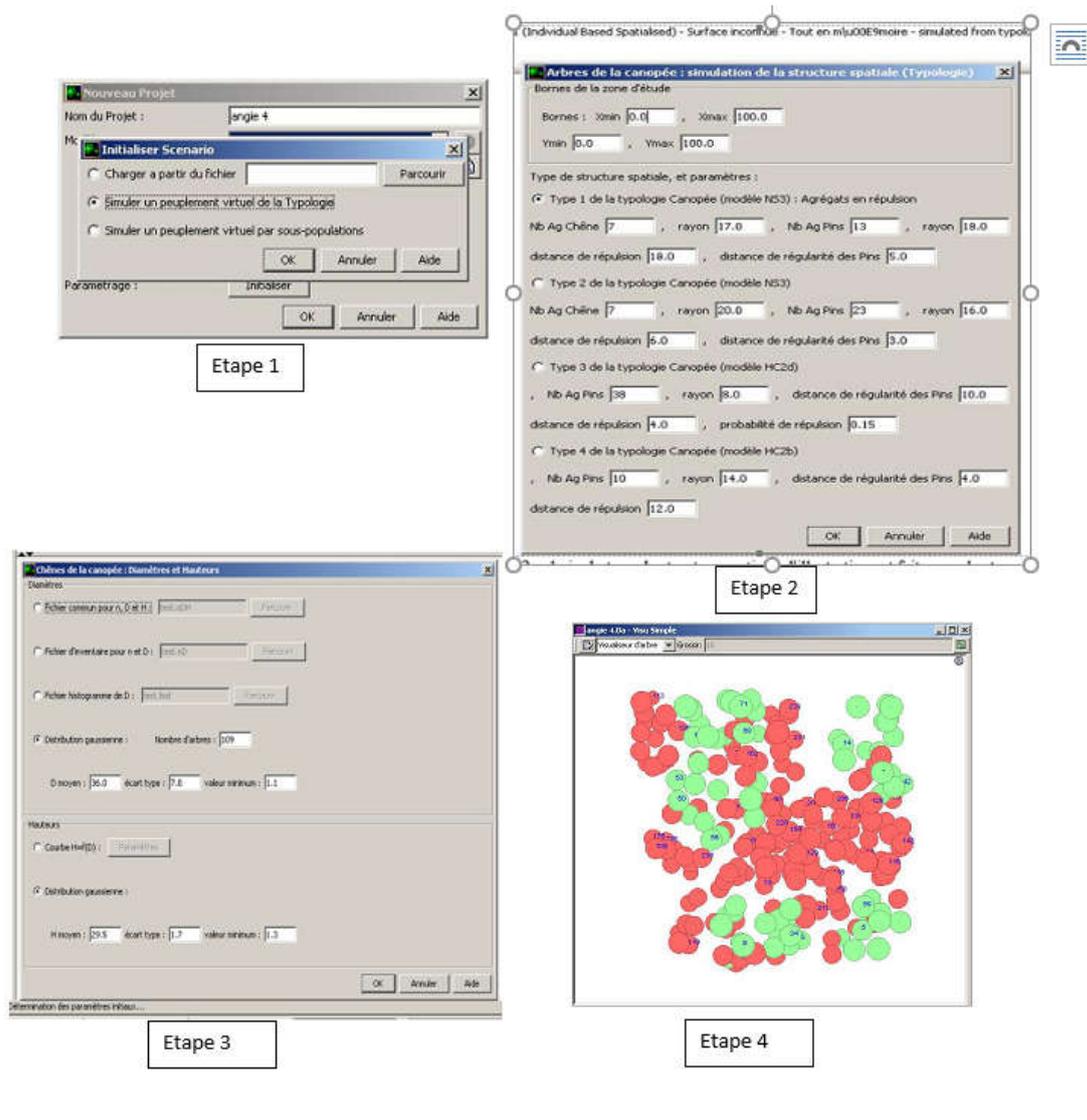


Figure 6 : Génération d'états initiaux réalistes pour le module Oak-Pine, modèle de croissance à l'échelle de l'arbre et spatialement explicite de la plateforme de simulation CAPSIS.

Étape 1 : initialisation à partir d'un peuplement virtuel simulé par nos modèles de structure ; étape 2 : choix du type de structure spatiale ; étape 3 : attribution des marques (diamètres et hauteurs) aux positions simulées ; étape 4 : peuplement virtuel obtenu

En plus de publications scientifiques (trois en première auteure sur le thème de l'interaction spatiale entre individus dans des peuplements forestiers mélangés), de nombreuses participations à des ateliers nationaux (dont ateliers avec l'ONF, réunions CAPSIS, etc.) et conférences internationales (dont IUFRO), les modèles que j'ai construits sont intégrés à un guide de sylviculture Chêne-Pin de l'ONF région Centre. Mes travaux de recherche participent ainsi effectivement à la fourniture d'outils de description et de gestion durables d'écosystèmes forestiers plurispécifiques.

Dans la suite de mes travaux, en plus de travailler sur l'identification de patterns spatiaux cohérents avec un maintien de la coexistence des espèces, j'ai travaillé sur la caractérisation de l'interaction entre organisation spatiale et performances des systèmes hétérogènes. Cette orientation provient du fait que les systèmes étudiés sont associés à la provision d'une diversité de services écosystémiques.

2.1.2 Interaction entre configurations spatiales et performances du système au sein des peuplements hétérogènes

A la suite de mon travail de thèse, je me suis intéressée aux performances des peuplements hétérogènes dans diverses configurations spatiales. En collaboration avec l'ONF d'Orléans et le Cemagref de Nogent sur Vernisson, nous avons comparé la productivité des espèces dans différents types de mélange. Pour cela les modèles de structure que j'ai construits ont servi d'états initiaux pour des modèles de croissance adaptés (arbre dépendant des distances) construits pour les mêmes peuplements chêne-pin de la forêt d'Orléans. Ces modèles de croissance sont individu-centrés, i.e. rendent compte de la croissance individuelle des arbres dans divers environnements locaux spatialement explicites (Ngo Bieng *et al.*, 2013b). Nous avons ensuite évalué l'impact des différents états initiaux (composition et structures spatiales initiales) sur la croissance des différents individus en mélange. Nous avons testé divers modèles de structure, incluant des modèles de structure complètement aléatoires, pour voir l'apport dans la précision de la démarche de caractérisation et modélisation de structure spatiale. Nous nous sommes intéressés à une performance précise de ces peuplements, leur productivité estimée par la croissance en surface terrière. La figure 7 présente la productivité des deux espèces principales (chêne et pin) dans deux types de mélange contrastés de la typologie de structure spatiale construite : le mélange d'agrégats monospécifiques (type 1) et le mélange « pied à pied » ou intime (type 2). Les productivités du chêne sessile et du pin sylvestre sont plus élevées dans le mélange intime que dans le mélange d'agrégats monospécifiques. Ces différences de productivité des espèces entre les deux types de mélange (de l'ordre de 11,3 % pour le pin et de 14,7 % pour le chêne) sont significatives.

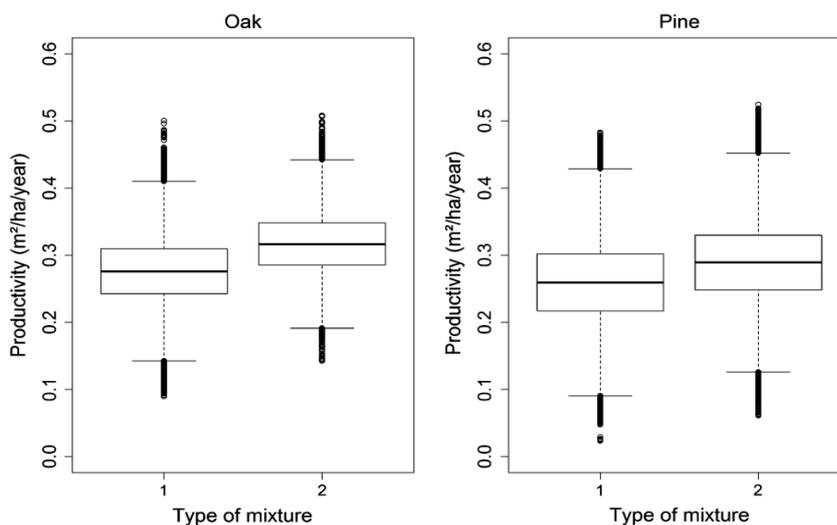


Figure 7 : Comparaison de la productivité du chêne et du pin entre les deux types de mélange : le mélange d'agrégats monospécifiques (type 1) et le mélange « pied à pied » ou intime (type 2) (Ngo Bieng *et al.*, 2013b)

Les variabilités de performances, en terme de productivité pour le cas présent, ont bien évidemment une explication multifactorielle dans de tels peuplements hétérogènes. Il est important de quantifier l'impact de l'interaction spatiale dans cette variabilité de performances. Pour les peuplements chêne-pin étudiés (figure 8), les deux facteurs principaux et significatifs sont respectivement (i) la parcelle (effet du site et du sol, de l'âge, de la densité), et (ii) l'organisation spatiale (le pattern spatial et le type de mélange).

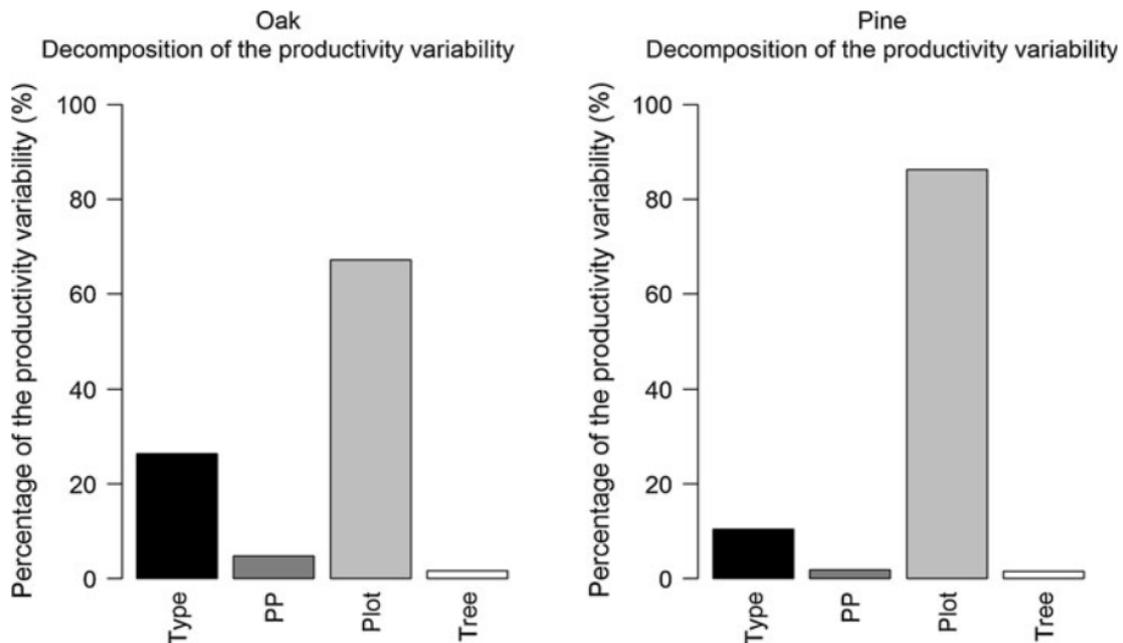


Figure 8 : Décomposition de la variabilité de la productivité pour le chêne et le pin en fonction des différentes sources suivantes : type de mélange (Type), pattern spatial au sein du type (PP), effet aléatoire parcelle (Plot), et effet aléatoire arbre (Tree)

La productivité des deux espèces est plus élevée dans le mélange intime, et le pattern spatial y joue un rôle significatif. Il apparaît ainsi que les deux espèces sont favorisées dans le mélange intime parce que leur compétition intraspécifique est plus sévère que leur compétition interspécifique. Ces résultats soutiennent clairement l'idée de favoriser les mélanges intimes dans les peuplements matures de chêne et de pin, afin d'optimiser la productivité des espèces d'arbres, le chêne étant l'espèce dont la productivité bénéficie le plus du mélange. Ce travail montre également que les modèles et les simulations fournissent des résultats intéressants pour la gestion durable des forêts mélangées, résultats qui sont complémentaires à l'expérimentation.

Même si les peuplements chêne-pin en milieu tempéré sont les « moins hétérogènes » du gradient de peuplements que j'ai eu à étudier, ils correspondent à des enjeux de diversification spécifique et de services écosystémiques qui sont communs à l'ensemble de peuplements forestiers auxquels je m'intéresse aujourd'hui. Ces travaux de modélisation de structure et de croissance, d'analyse et la modélisation de l'interaction avec des performances du système, sont alors orientés vers la production d'éléments permettant de définir les conditions de coexistence durable pour des espèces en mélange, et d'amélioration de performances des peuplements hétérogènes. Ces travaux ont été à la base et ont alimenté les travaux que j'ai effectués dans un deuxième temps dans un contexte différent : l'agroforesterie tropicale.

2.2 Interactions spatiales entre individus et leur impact sur des processus écologiques naturels au sein de systèmes agroforestiers tropicaux

Dans le cadre de mon premier poste à l'UMR SYSTEM du Cirad (Ecologie spécialisée en modélisation des systèmes cultivés complexes), j'ai monté un projet de recherche qui appliquait le concept d'analyse d'organisation spatiale des individus à la caractérisation, la compréhension et la modélisation d'agrosystèmes complexes. Mon projet scientifique avait alors pour objectif d'utiliser le concept de niche spatiale réalisée des individus pour : (i) comprendre le fonctionnement des systèmes cultivés complexes (plurispécifiques, multistrates), (ii) intensifier dans ces systèmes la réalisation de processus

écologiques naturels, via une optimisation de l'organisation spatiale des individus cultivés. L'optimisation spatiale des individus dans des systèmes cultivés serait ainsi en agriculture une innovation d'ingénierie écologique, sur la base de la théorie de la niche écologique réalisée. Ainsi, cette ingénierie assurerait la création d'environnements locaux assurant une dynamique adéquate de chacun des individus, en favorisant des environnements locaux présentant une disponibilité adéquate de ressources et de conditions microclimatiques nécessaires à la viabilité (et plus dans le cas présent à la productivité) des individus cultivés.

En effet, sur la base des processus écologiques (et anthropiques) qui sous-tendent la réalisation de différents patterns spatiaux, je voyais de manière très claire comment ce concept fondamental pour la coexistence entre individus dans les systèmes naturels pouvait être mobilisé en agronomie. L'objectif était alors d'influencer de manière naturelle les conditions de dynamique individuelle : impact sur l'environnement local autour de chacun des individus de la communauté, influence sur les conditions de dynamique individuelle, résultat entre autre de processus de compétition ou de facilitation locale, d'hétérogénéité de partage des ressources, etc. Modifier les dynamiques individuelles a une influence sur les performances individuelles et les processus écologiques naturels liés aux services écosystémiques, et in fine sur les performances de l'ensemble du système. J'ai alors mobilisé des éléments de mes travaux de recherche précédents (sections 2.1.1 et 2.1.2), et compétences acquises pour appliquer ces outils et concepts de l'écologie pour des problématiques agronomiques. J'ai mis en place et supervisé des travaux de recherche présentant une transversalité entre systèmes tempérés et tropicaux ; tout en offrant des perspectives concrètes de modélisation des dynamiques et performances de systèmes hétérogènes. Ces travaux et leurs résultats ont été obtenus :

(i) dans le cadre de la thèse Cynthia Gidoin que j'ai proposée et encadrée : étude de l'interaction entre structure du peuplement végétal et intensité d'attaque trois bioagresseurs du cacaoyer : la moniliose au Costa Rica, la pourriture brune et les mirides au Cameroun ;

(ii) dans le cadre des stages de recherche niveau Master de Cynthia Gidoin, Quentin Rougelot, et Chloé Curtet que j'ai proposés et encadrés ;

(iii) dans différentes collaborations avec des chercheurs partenaires dont j'ai monté les projets d'accueil au sein du Cirad ;

(iv) dans le cadre d'actions de recherche que j'ai coordonnées, notamment au sein du projet SAFSE : Recherche de compromis entre productions et services écosystémiques fournis par les systèmes agroforestiers tropicaux.

Les résultats de ces travaux de recherche ont fait l'objet de co-publications avec ces collègues étudiants et jeunes chercheurs partenaires (11 articles et 2 chapitres d'ouvrage), entre 2012 et 2023.

Je me suis principalement concentrée sur le service de régulation des bioagresseurs : c'est un élément principal de réduction de la productivité agricole (Chave *et al.*, 2014). De plus, la régulation naturelle de bioagresseurs impliquant des méthodes respectueuses de l'environnement est un challenge de l'agroécologie pour l'agriculture en général, et les agricultures du Sud en particulier. J'ai monté les nécessaires collaborations avec des collègues spécialistes de la régulation des bioagresseurs de cultures : agronomes, phytopathologistes, épidémiologistes, etc. Ces collaborations ont permis une compréhension fine des mécanismes sous-jacents à l'interaction entre « structure spatiale » et régulation des bioagresseurs, avec l'objectif de les mettre en évidence, de les quantifier et finalement de les moduler par des pratiques agroécologiques adaptées.

J'ai travaillé sur des systèmes agroforestiers tropicaux à base de cacaoyer, avec l'objectif de (i) comprendre le fonctionnement des systèmes cultivés à travers la caractérisation des interactions spatiales entre les individus constituant leur strate arborée (arbres forestiers, fruitiers, cultures

péreennes) ; pour (ii) optimiser les performances agronomiques et écologiques des systèmes cultivés, à travers l'optimisation de l'organisation spatiale des individus. Dans ces systèmes, j'ai travaillé précisément sur la caractérisation de l'organisation spatiale des individus à l'échelle de la parcelle, dans l'objectif de : (i) mettre en évidence des performances spécifiques, ou des spécificités de fourniture de services écosystémiques dans différentes configurations spatiales ; (ii) mettre en évidence des spécificités de partage de ressource (lumineuse principalement) entre les individus cultivés et associés dans différentes configurations spatiales ; (iii) évaluer l'influence des pratiques de gestion agricole (réelles ou potentielles) sur l'organisation spatiale des arbres dans des systèmes cultivés.

Quand on travaille sur l'interaction entre structure spatiale du peuplement végétal et intensité d'attaque d'un bioagresseur, on s'intéresse en fait à l'effet de régulation physique (Gidoïn, 2013). L'effet physique d'une plante sur un organisme bioagresseur est l'effet de cette plante en tant que barrière physique. Cette barrière s'exerce directement sur l'organisme et sur son déplacement, mais également sur les variables abiotiques du système (lumière, température, eau, vent), ce qui aura pour effet de créer un microclimat qui sera susceptible d'affecter l'organisme et sa plante hôte. L'effet physique dépend donc de la structure spatiale des plantes de l'agroécosystème. La structure spatiale du peuplement végétal associé à la culture agit alors principalement sur la régulation des bioagresseurs à travers la modification du microclimat. En effet, la présence d'arbres associés à une culture tamponne la température de l'air et du sol, diminue la vitesse des vents, la quantité et la qualité de lumière transmise, et enfin augmente l'humidité relative de l'air et l'humidité des sols sous canopée (Avelino *et al.*, 2011). La structure spatiale du peuplement végétal influence ce microclimat à travers ses caractéristiques verticales et horizontales. La structure verticale des arbres influence à la fois la quantité, la qualité et la répartition de la ressource lumineuse sous canopée. On observe par exemple un ombrage réparti de façon homogène dans les parcelles à structure régulière, cet ombrage est réparti de façon de plus en plus hétérogène à mesure que la structure des arbres tend vers l'agrégation (Martens *et al.*, 2000). Les effets directs du microclimat sont nombreux et peuvent avoir lieu à différents moments du cycle de vie des bioagresseurs (Gidoïn, 2013). Par exemple, la lumière, en particulier les ultraviolets, stimulent la sporulation de nombreuses espèces fongiques. La réduction de l'impact des gouttes de pluie peut réduire la dispersion des spores du fait de la diminution des éclaboussures. L'effet indirect du microclimat sur les bioagresseurs agit principalement par le biais de son impact sur la culture ou sur les auxiliaires des bioagresseurs.

De manière complémentaire à cet effet microclimatique, l'interaction spatiale entre plantes hôtes et plantes associées influence la présence des bioagresseurs. A l'échelle du peuplement, considérons les trois motifs d'interaction spatiale (intertype) présentés précédemment (section 2.1.1. Identification de patterns qui gouvernent la répartition spatiale, etc.), et dans ce cas entre plantes cultivées hôtes et plantes associées dans des systèmes agroforestiers : l'indépendance spatiale dans la parcelle, l'attraction ou la répulsion. Dans le motif d'attraction spatiale, les distances entre les individus de la plante hôte cultivée et les arbres associés sont les plus faibles. La plante hôte est alors majoritairement située dans les zones sous le couvert des arbres d'ombrage. On peut alors faire l'hypothèse que l'intensité des mécanismes de régulation des bioagresseurs liés au microclimat sera augmentée dans cette configuration. De même, dans cette configuration, les distances entre individus hôtes augmentent la probabilité d'un effet barrière physique qui s'exerce directement sur le déplacement du bioagresseur ou sa forme de dissémination, mais également a une influence sur les variables abiotiques du système (lumière, eau, vent). A l'inverse, un motif de répulsion spatiale entre les positions des individus de la plante hôte et celles des individus des arbres d'ombrage situe les individus de la plante hôte majoritairement dans les zones entre les arbres d'ombrage et ainsi minimiserait les mécanismes de régulation des bioagresseurs liés aux variations microclimatiques.

Mes travaux de recherches sur la caractérisation de l'organisation spatiale des individus, et son interaction avec des spécificités du service de régulation de différents bioagresseurs dans différentes configurations spatiales ont impliqué la prise en compte d'échelles parcellaire et intraparcellaire (individuelle). Cette application aux peuplements tropicaux m'a aussi permis d'intégrer la diversité des individus composant ces peuplements hétérogènes.

2.2.1 A l'échelle parcellaire

Dans le cadre de la thèse de Cynthia Gidoin, les recherches portaient sur l'analyse de structure spatiale des individus (arbres et cacaoyers) des parcelles agroforestières de la zone de Talamanca au Costa Rica et d'Obala au Cameroun. La zone de Talamanca est la première zone de production de cacao au Costa Rica. La production en cacao est assez faible du fait des dommages causés par la moniliose, de l'ancienneté et de la gestion extensive des systèmes, mais aussi de l'éloignement des zones de commercialisation. Les systèmes de la région d'Obala sont plus productifs, gérés plus intensivement, et situés près de la capitale du Cameroun (proximité de marchés). L'analyse des structures spatiales a été réalisée à partir de la position des individus dans les parcelles et des fonctions de Ripley mono et bivariées décrites précédemment (Ngo Bieng *et al.*, 2006; Ngo Bieng *et al.*, 2013a). Pour chacun des individus positionnés, nous avons noté son espèce, et la catégorie à laquelle il appartenait : cacaoyer, arbre forestier, fruitier ou bananier. La figure 9 représente une schématisation du travail cartographique.

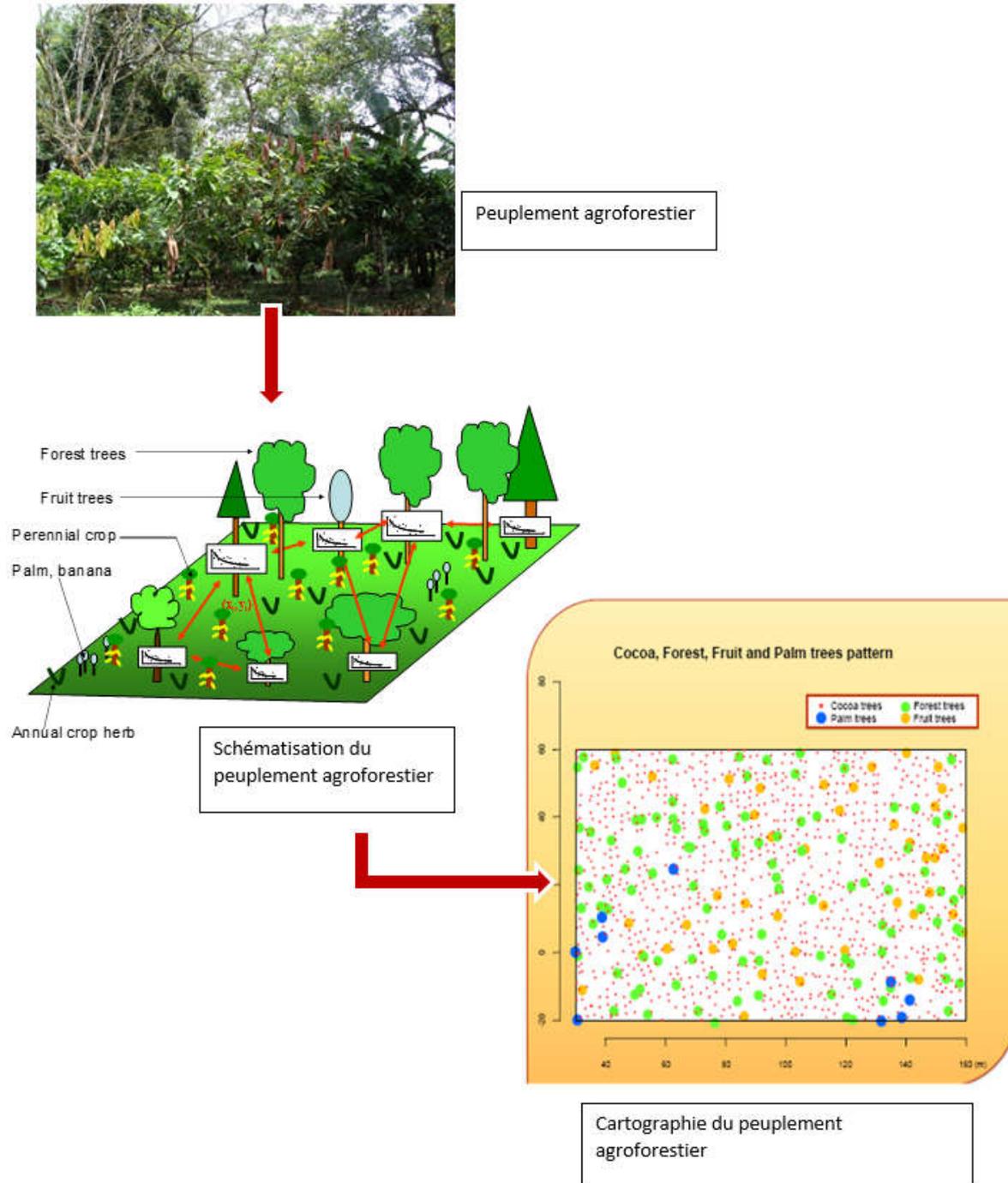


Figure 9 : Schématisation du travail cartographique des peuplements agroforestiers étudiés, du peuplement au semis de points

Dans les systèmes agroforestiers étudiés, nous avons évalué les intensités d'attaque en fonction des bioagresseurs étudiés. Pour les maladies (fongiques en général), il s'agit du nombre de cabosses endommagées sur le nombre total de cabosses par parcelle (Ngo Bieng *et al.*, 2013a; Gidoïn *et al.*, 2014a) ; pour les ravageurs, il s'agit de leur densité dans chacune des parcelles (Gidoïn *et al.*, 2014b).

Pour analyser l'interaction entre différentes configurations spatiales et l'intensité d'attaque de différents bioagresseurs, nous avons utilisé une méthode de régression linéaire multiple (Hierarchical partitioning (Mac Nally, 2002)). Cette méthode permet d'étudier les relations de causalité entre nos variables à expliquer (intensités d'attaque) et explicatives (avec des variables relatives à la structure du peuplement, notamment la structure spatiale). L'analyse des configurations spatiales est centrée

spécifiquement sur les arbres d'ombrage, car les cacaoyers, plantés ont en général une structure spatiale régulière (même si la distance de régularité peut être variable et affecter dans certains cas des intensités d'attaque).

Dans les articles relatifs à ce travail de thèse, (Ngo Bieng *et al.*, 2013b; Gidoïn *et al.*, 2014a; Gidoïn *et al.*, 2014b), nous avons construit des typologies de structure spatiale des peuplements agroforestiers étudiés, et mettons en évidence une diversité d'organisations spatiales des arbres d'ombrage forestiers. Nous montrons ensuite clairement un effet significatif de la structure spatiale horizontale des arbres forestiers sur les intensités d'attaque des différents bioagresseurs étudiés au Costa Rica et au Cameroun : l'intensité d'attaque de la moniliose (maladie fongique) et des mirides est plus importante dans les parcelles caractérisées par une faible densité et une structure agrégée des arbres forestiers. Cette intensité d'attaque est plus faible dans les parcelles à structure aléatoire et à structure régulière des arbres forestiers (figure 10).

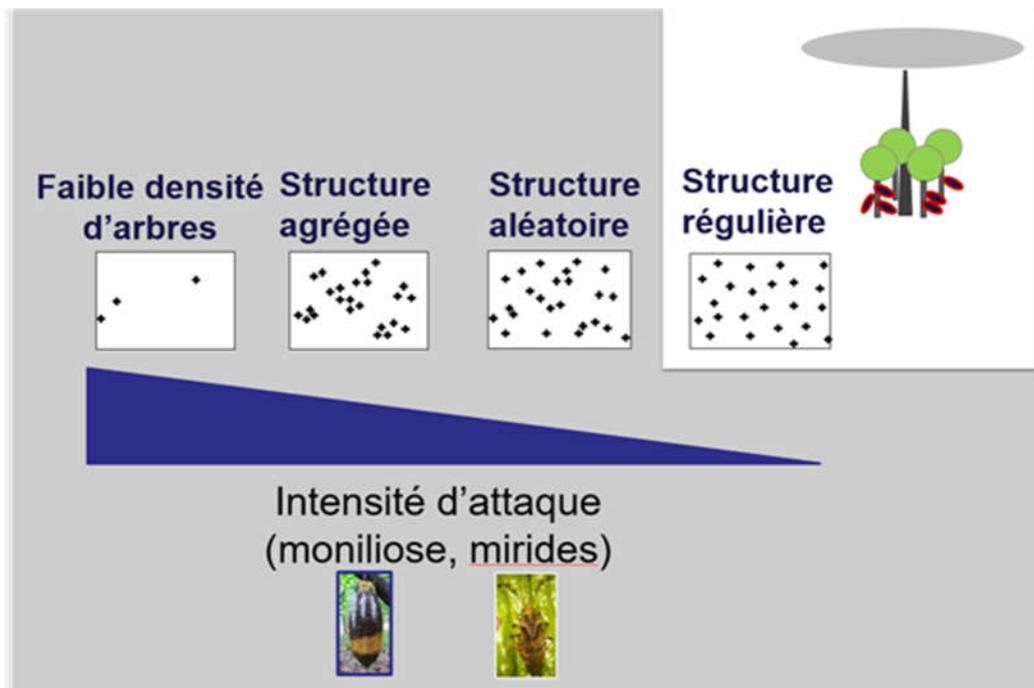


Figure 10 : Schématisation de l'interaction entre structure spatiale des arbres et intensité d'attaque de deux bioagresseurs

En plus de mettre en évidence une diversité d'organisations spatiales d'individus au sein de ces peuplements agroforestiers, nous avons utilisé les analyses de structure spatiale pour répondre à des questions épidémiologiques. Nous avons évalué les effets indépendants de la disponibilité de la ressource (effet biologique) et des variations microclimatiques (effet physique, lié à la variabilité de patterns spatiaux) sur l'intensité d'attaque des différents bioagresseurs étudiés. Au Costa Rica par exemple, les analyses corrélatives et leurs interprétations fines montrent que l'organisation spatiale des arbres d'ombrage (effet microclimatique) explique une part plus importante de la variabilité de l'intensité d'attaque que la quantité de tissus sensible (nombre de cabosses = productivité) dans les dispositifs étudiés, les deux variables étant significatives (figure 11).

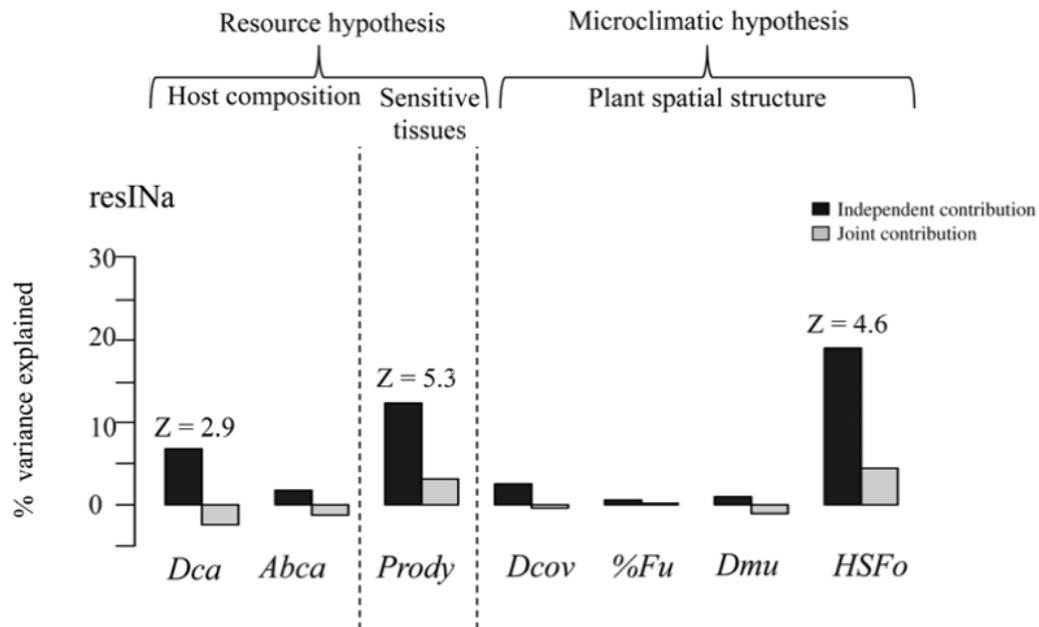


Figure 11 : Contribution indépendante et contribution conjointe (pourcentage de la variance expliquée) de différentes variables liées aux effets ressource et climatique dans la variabilité de l'intensité d'attaque de la moniliose sur les cabosses de cacaoyer.

Les contributions indépendantes significatives sont indiquées par leurs valeurs de Z-score. Les variables liées à l'effet ressource sont : la densité de cacaoyers (Dca), l'abondance des cacaoyers (Abca), la productivité des cacaoyers (Prody). Les variables liées à l'effet climatique sont : la densité d'arbres d'ombrage (Dcov), le pourcentage de fruitiers dans les arbres d'ombrage (%Fu), la densité de musaceae (Dmu), et la structure spatiale des arbres forestiers (HSFo), tirée de Gidoïn *et al.* (2014a)

Je voudrais illustrer rapidement les potentiels leviers de régulation agroécologique sur la base des mécanismes sous-jacents présentés plus haut, impliquant la prise en compte de l'organisation spatiale d'individus hôtes et non-hôtes dans une parcelle cultivée. A l'échelle de la parcelle, nous montrons que des organisations spatiales régulières ou aléatoires d'arbres forestiers sont corrélées à de plus faibles intensités d'attaques de la moniliose au Costa Rica et des mirides au Cameroun. Au Costa Rica, la moniliose est une maladie fongique dont les conditions microclimatiques de plein soleil facilitent la dispersion (faible humidité relative de l'air et vitesse des vents importante) tandis que celles sous ombrage (forte humidité relative de l'air) facilitent le développement des spores. Ces deux conditions sont rencontrées dans les parcelles à faible densité en arbres forestiers et à structure agrégée des arbres forestiers, respectivement entre les agrégats et sous les agrégats d'arbres forestiers, ce qui pourrait expliquer les forts taux d'attaque de moniliose observés dans ces parcelles (Gidoïn *et al.*, 2014a).

Au Cameroun, la densité plus élevée de mirides, dans les parcelles à structure agrégée des arbres forestiers pourrait être expliquée par leur présence dans des zones éclairées (entre les agrégats d'arbres forestiers). En effet ces zones pourraient fournir plus de ressources (cabosses et jeunes pousses) à ces insectes piqueurs suceurs. Dans ces zones moins ombragées, les conditions de développement des mirides sont cependant considérées comme sous-optimales, les mirides étant des insectes photo-phobiques (Babin *et al.*, 2010). L'augmentation de l'auto-ombrage (ombrage donné par le cacaoyer lui-même) pourrait alors compenser les effets négatifs du manque d'ombrage entre les agrégats sur le développement des mirides. Pour corroborer cette hypothèse, j'ai mis en place et encadré le stage de Quentin Rougelot, sur la caractérisation de l'influence de l'organisation spatiale et

de la composition des strates d'ombrage sur la distribution de la ressource lumineuse dans les systèmes agroforestiers étudiés (voir ci-dessous l'exemple présenté en Colombie). Nous avons alors trouvé que les zones à priori moins ombragées (entre les agrégats d'arbres forestiers) correspondaient à des houppiers de cacaoyer plus grands et plus denses, qui fournissaient des taux de fermeture de canopée et des conditions ombragées favorables à l'installation des ravageurs étudiés.

Un potentiel levier de régulation agroécologique ou d'ingénierie écologique serait alors de favoriser une répartition spatiale régulière des arbres d'ombrage dans les parcelles agroforestières étudiées.

Une possibilité nouvelle et importante dans l'application des analyses et interprétations de patterns spatiaux aux peuplements tropicaux, plus divers, est la prise en compte de la diversité des individus dans les peuplements. Cette nouveauté permet d'accéder aux interactions structure/diversité et composition/performances, avec ainsi une vue plus intégrale des spécificités du fonctionnement des systèmes hétérogènes. Si on reprend le cas de la moniliose au cacaoyer au Costa Rica, on constate dans les parcelles étudiées que l'intensité du bioagresseur a tendance à être inférieure dans les parcelles avec une plus grande diversité spécifique. Cette interprétation classique de l'hypothèse de dilution de la ressource est enrichie dans notre cas par les interprétations fournies par les analyses de structure spatiale. La diversité spécifique est ici corrélée à la régularité de l'ombrage, qui a un impact négatif sur la productivité du cacaoyer et ainsi sur la ressource disponible pour le pathogène.

Dans le cas de la collaboration avec l'Universidad de la Amazonia Colombiana, qui a donné lieu à quatre publications (Suárez Salazar *et al.*, 2018; Suárez *et al.*, 2021a; Suárez *et al.*, 2021b; Álvarez *et al.*, 2023), nous avons approfondi la thématique de l'interaction structure/biodiversité et composition/performances du système agroforestier. Nous avons alors construit une typologie de peuplements incluant des variables de structure et de diversité d'arbres d'ombrage (Suárez Salazar *et al.*, 2018) (figure 12).

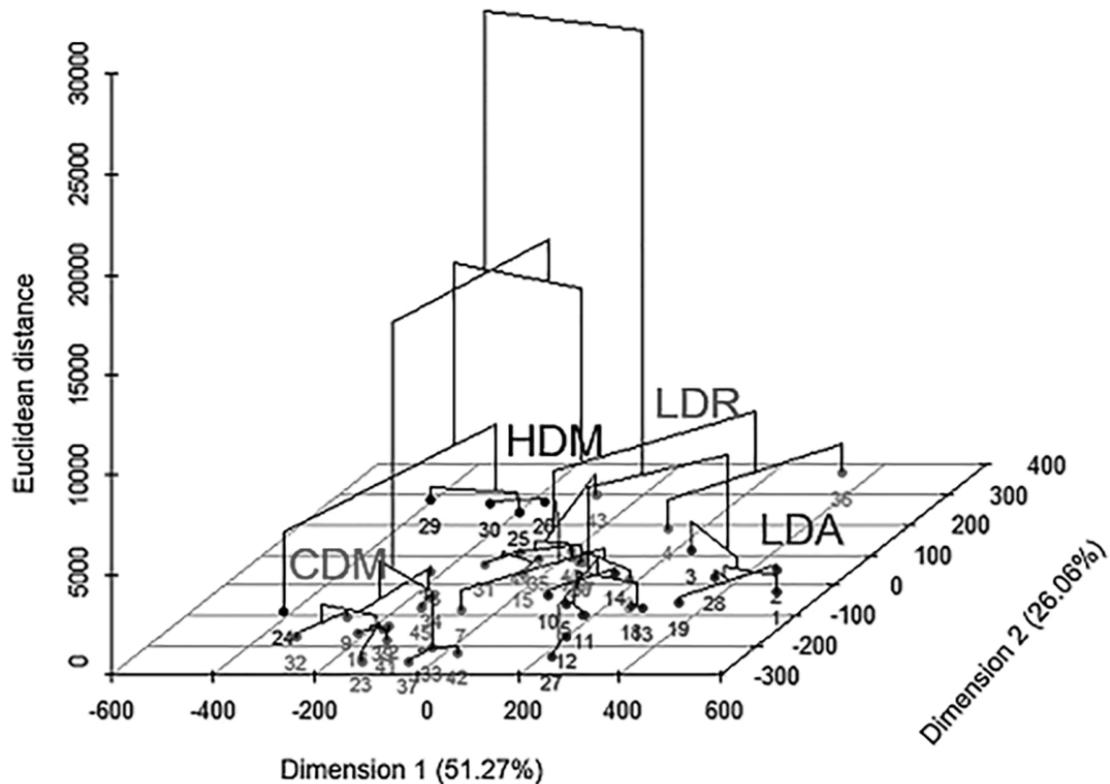


Figure 12 : Typologie de peuplements agroforestiers à base de cacaoyers, construite à partir de variables de diversité et de structure de la canopée.

Les quatre types identifiés sont : complexes diversifiés et multistrates (CDM), faible diversité d'arbres à pattern régulier (LDR), faible diversité d'arbres à pattern agrégé (LDA), et forte densité de Musaceae (HDM) (Suárez Salazar *et al.*, 2018)

Nous avons ensuite analysé divers processus et propriétés déterminant le fonctionnement de ces systèmes cultivés multi-espèces et multi- strates : la répartition et la disponibilité de lumière pour le sous-étage cultivé, le bilan hydrique et l'efficacité d'utilisation de l'eau, la fertilité du sol. L'exemple de la disponibilité de lumière pour le sous-étage est particulièrement important pour la gestion des systèmes agroforestiers. La lumière est en effet un important facteur limitant la production des individus cultivés en sous-étage. Pour le cas des types de peuplements identifiés ci-dessus, nous avons estimé (photographies aériennes) et modélisé (SEI-FS¹ et Shademotion 4.0²) la disponibilité de lumière pour le sous-étage dans les configurations de structure et de diversité des différents types (voir figure 13).

¹ <http://www.worldagroforestry.org/output/sexi-fs-spatially-explicit-individual-basedforest-simulator>

² <http://shademotion.net/>

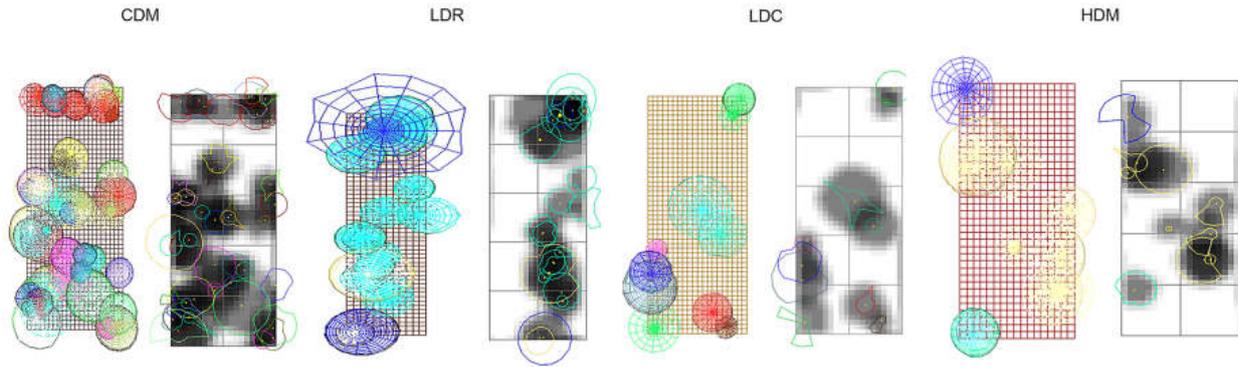


Figure 13 : Illustration de la disponibilité de lumière et d'ombrage pour quatre types de système agroforestier.

Les simulations de la structure ont été réalisées par le logiciel SEI-FS et les simulations de projection d'ombre par le logiciel Shademotion (Suárez Salazar *et al.*, 2018)

Les configurations de structure et de biodiversité ont une influence sur la disponibilité et la distribution de la lumière pour le sous-étage. Dans les peuplements étudiés, la disponibilité de lumière est maximale pour le type HDM (ombrage de musaceae) et minimale dans le type CDM (complexe diversifié et multistrates). Cependant, une caractérisation précise de la quantité de lumière disponible dans le sous-étage de l'ensemble des types montrent qu'ils sont tous compatibles avec un bon développement écophysologique du cacaoyer (Suárez Salazar *et al.*, 2018). Ce qui signifie que même les parcelles les plus ombragées (du type CDM, qui sont aussi celles qui abritent une plus grande diversité d'espèces) ont dans le sous-étage une disponibilité de lumière compatible avec un bon développement écophysologique des cacaoyers. Ce résultat est très important, car la disponibilité de lumière pour les cultures en sous-étage est l'un des principaux facteurs de réduction de l'ombrage dans des peuplements agroforestiers.

Ces résultats ont été particulièrement édifiants pour moi, car la collaboration avec ces collègues colombiens s'effectuait dans un contexte post conflit, où le cacao était promu comme « culture de la paix », pour remplacer les cultures illicites (Suárez Salazar *et al.*, 2018). Il en résultait donc un besoin important de connaissances sur les particularités de fonctionnement et la gestion durable de ces systèmes. L'objectif est d'éviter que le développement de ces systèmes agricoles se fasse au détriment des forêts immensément biodiverses de cette zone tropicale, dont certaines zones sont déjà reconnues comme des hotspots de déforestation (Baptiste *et al.*, 2017). La déforestation y est associée notamment à l'intensification agricole (élevage intensif, plantations monospécifiques de cacaoyères, etc.). Les systèmes agroforestiers à base de cacaoyers (plante originaire du sous-étage des forêts tropicales, tolérante et durablement productive dans des conditions d'ombrage), apparaissent alors comme une voie de restauration de terres dégradées, préservant une partie de la diversité locale, grâce à la diversité des arbres d'ombrage qu'ils peuvent héberger (Suárez *et al.*, 2021b). De la même manière, nous avons monté une collaboration dans le but de restaurer une diversité de processus écologiques liés à la présence d'arbres dans des systèmes sylvo-pastoraux (Álvarez *et al.*, 2023).

2.2.2 A l'échelle intraparcellaire, i.e. de l'individu

A la suite de ces caractérisations interparcellaires, et pour avoir accès aux variations d'environnements locaux, de manière à détecter les environnements locaux favorables ou défavorables au développement de bioagresseurs spécifiques, j'ai monté une expérimentation et un travail de stage de master pour caractériser les variations intraparcellaires de l'organisation spatiale des individus autour d'un individu hôte. De manière complémentaire aux analyses interparcellaires qui sont

centrées sur les arbres (non-hôtes, accompagnateurs des individus cultivés hôtes), l'idée était ici de centrer les analyses sur les individus hôtes, de manière à définir les environnements spatiaux corrélés à une moindre sensibilité aux bioagresseurs considérés. La diversité biologique plus importante de ces systèmes rend cette analyse intraparcellaire pertinente. L'analyse a été conduite dans des parcelles agroforestières de la zone d'Upala au Costa Rica, et sur la moniliose. Upala est la deuxième zone de production de cacao après Talamanca. On constate à Upala, une volonté de relancer l'activité cacaoyère dans des systèmes avec un ombrage moins dense et moins divers qu'à Talamanca, une pratique de la récolte sanitaire, des jeunes plantations utilisant des variétés améliorées partiellement résistantes à la moniliose. Dans les parcelles étudiées, l'intensité individuelle d'attaque par la moniliose a été caractérisée pour chacun des cacaoyers évalués (échelle individuelle) comme le pourcentage de cabosses malades sur le nombre total de cabosses. L'intensité d'attaque individuelle d'un cacaoyer a été expliquée par son nombre de voisins en utilisant un modèle linéaire mixte généralisé (GLMM). Dans l'étude réalisée (Ngo Bieng *et al.*, 2017), nous avons procédé à une exploration de paramètres du GLMM, pour caractériser l'effet de l'identité des voisins (cacaoyer, forestier, fruitier, bananier) et de la distance des voisins (0 à 10 m) sur les variations d'indices d'attaque (figure 14). Nous trouvons une variabilité de l'intensité d'attaque du bioagresseur étudié, en fonction du voisinage local (densité, identité et distance des voisins). Nous présentons alors des éléments précis de cette variabilité individuelle de l'intensité d'attaque et de ses variables explicatives.

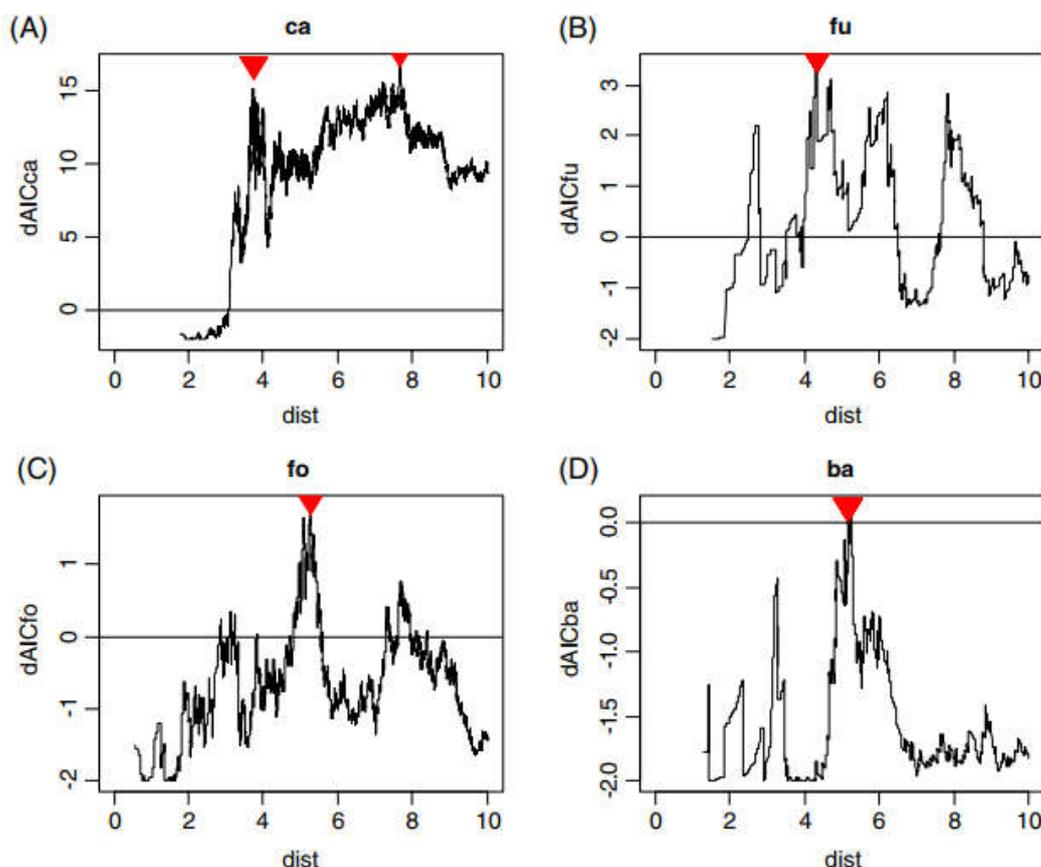


Figure 14 : Illustration de l'exploration de paramètres du GLMM, qui consiste à faire varier les distances des voisins de cacaoyers suivis en fonction de leur identité, et d'observer la variation résultante de l'indice d'attaque. Le modèle nul explique la variation de l'intensité d'attaque seulement par deux facteurs aléatoires, la parcelle et la productivité. Les autres modèles prennent en compte les facteurs fixes : identité et distance des voisins. Les distances qui correspondent à la plus grande différence d'AIC par rapport au modèle nul (ΔAIC) sont indiquées par des triangles rouges. (A) montre la distance optimale pour les voisins cacaoyers (ca) ; (B) pour les voisins arbres fruitiers (fu) ; (C) pour les voisins arbres forestiers (fo) ; (D) pour les voisins bananiers (ba)

Cette étude à l'échelle individuelle permet d'approfondir les connaissances sur la dissémination des pathogènes dans des configurations spatiales données. Dans le cas étudié, nous avons fait l'hypothèse que cette influence était due à un effet barrière dans la dispersion des pathogènes lié à l'architecture du cacaoyer (Ngo Bieng *et al.*, 2017). Des traits architecturaux comme le LAI, la hauteur du houppier, la rugosité du houppier, la longueur des branches, la position des branches et des feuilles diminuent la porosité du houppier des arbres de cacao, conduisant à des distances de dispersion réduites. De plus, les branches de cacao peuvent s'étaler du sommet jusqu'au sol, ce qui contribue à renforcer la porosité du houppier de cacao. Ces traits architecturaux sont pertinents pour les cas de dispersion passive de spores, comme c'est le cas pour des maladies fongiques telles que la moniliose. Les organes non-hôtes des cacaoyers constituent une barrière efficace à la dispersion des spores de la moniliose jusqu'aux organes hôtes, les cabosses. Une distribution spatiale optimale des organes non-hôtes aux alentours de chacun des cacaoyers infectés participe ainsi à une réduction de la dispersion de la maladie. Pour les arbres forestiers, en plus de leur faible densité, leur architecture contribue peu à leur porosité, car uniquement leurs troncs agissent comme barrière à la distribution des spores.

En plus de cet effet barrière, les fruitiers ont aussi un impact sur la disponibilité de lumière autour de l'individu cacaoyer considéré. On observe en effet que plus un cacaoyer a de voisins fruitiers à une distance donnée (évaluée pour les systèmes étudiés à environ 4m), moins il est infecté. Les fruitiers sont plus petits que les arbres forestiers et fournissent un ombrage plus dense et plus localisé. Cet ombrage localisé réduit ainsi la production des cacaoyers ayant des fruitiers dans leur voisinage. Ce résultat nous a aussi conduit à émettre une hypothèse d'hôtes secondaires chez les fruitiers (effet dilution), hypothèse que nous n'avons pas pu corroborer par un travail de recherche adéquat. Nos résultats permettent de souligner l'importance de la diversité des arbres d'ombrage et de leur organisation spatiale dans les systèmes agroforestiers. Au Cameroun par exemple, l'intensification des systèmes agroforestiers se traduit par une augmentation de la densité en fruitiers. Tout en apportant une source de revenus complémentaires aux agriculteurs (diversification de la production), ce choix peut apparaître intéressant pour l'état sanitaire des parcelles agroforestières.

Les actions de recherche que j'ai mises en œuvre dans les systèmes agroforestiers tropicaux mettent en évidence une diversité d'organisations spatiales des individus dans les systèmes agroforestiers à base de cacaoyers étudiés au Costa Rica et au Cameroun. Les organisations spatiales sont clairement reliées à des processus écologiques et anthropiques décrits, et impactent le fonctionnement des écosystèmes cultivés étudiés. Appréhender les structures spatiales de ces écosystèmes hétérogènes permet de les décrire avec précision, et donnent encore une fois des éléments précis par rapport à des spécificités de leur dynamique. Les résultats montrent une influence significative de l'organisation spatiale des individus sur des propriétés émergentes du système dans des agroforêts tropicales au Costa Rica, en Colombie et au Cameroun : intensités d'attaque de bioagresseurs, productivité, répartition de ressources, etc. Pour le cas spécifique des bioagresseurs, cette influence significative se fait par le biais d'une modification de l'environnement local autour de chacun des individus hôtes, ici les cacaoyers. Cette modification de l'environnement local implique une modification des conditions microclimatiques autour des cacaoyers. C'est principalement par la compréhension de ces effets microclimatiques en relation avec les conditions de développement épidémiologiques des bioagresseurs étudiés, que ces analyses nous donnent accès à de potentiels leviers de régulation agroécologiques de bioagresseurs. J'ai montré que l'organisation spatiale des individus, rarement prise en compte dans la littérature et dans la gestion des systèmes agroforestiers (et cultivés en général), influence l'intensité d'attaque de bioagresseurs. Ces résultats révèlent l'importance de variables de structure spatiale et donnent des pistes nouvelles de régulation agroécologiques au sein de systèmes complexes. Ils ouvrent la perspective d'une optimisation de l'organisation spatiale des individus cultivés dans un objectif de limiter la réceptivité des parcelles agroforestières aux bioagresseurs. La gestion de la structure spatiale des arbres d'ombrage constitue clairement un levier intéressant pour

la gestion agroécologique des bioagresseurs, du moins pour les systèmes agroforestiers et les bioagresseurs étudiés.

A la suite du projet de recherche que j'ai mis en place au sein de l'UMR SYSTEM, j'ai établi de nombreuses collaborations avec l'UR « Bioagresseurs » du Cirad (aujourd'hui incluse dans l'UMR PHIM). Ces collaborations avaient justement pour objectif de travailler sur l'interaction entre structure spatiale du peuplement cultivé et indice d'attaque de divers bioagresseurs tropicaux, avec les ambitions de comprendre de manière fine des mécanismes sous-jacents à la dissémination du bioagresseur, et le cas échéant d'envisager des stratégies d'optimisation de l'organisation spatiale des individus pour limiter la réceptivité du peuplement aux bioagresseurs étudiés.

Dans différents travaux avec l'actuelle UMR PHIM (Oro *et al.*, 2012; Akoutou Mvondo *et al.*, 2019; Ndoungué Djeumekop *et al.*, 2020), les analyses de structure spatiale de différentes qualité d'hôtes (sains, infectés, morts) ont été appliquées pour comprendre les mécanismes de dispersion de bioagresseurs dans des parcelles de cacao (systèmes agroforestiers ou plantations expérimentales monospécifiques), respectivement pour le virus swollen shoot du cacao au Togo, pour le *Phytophthora* foot rot des agrumes et le *Phytophthora megakarya* du cacao au Cameroun.

J'ai aussi donné suite à plusieurs sollicitations de formation, de participation à jury et comités de thèse, et de collaborations de recherche.

Le changement de cadre, de l'écologie forestière en système tempéré à l'agronomie tropicale, qui a été un défi important dans mon cursus scientifique, apparait comme un élément original et enrichissant de mon parcours de recherche. Cela me permet d'avoir une bonne connaissance de problématiques environnementales et agroécologiques dans des territoires où ces différents usages de sol coexistent, et d'y positionner des activités de recherches fondamentale et appliquée.

En effet, comme en Amazonie colombienne, les systèmes naturels et cultivés coexistent de plus en plus intimement dans les paysages tropicaux et se traduisent par une pression anthropique forte sur, et une vulnérabilité accrue, des systèmes forestiers (Ngo Bieng *et al.*, 2021; Pendrill *et al.*, 2022). Un défi urgent de la recherche est de fournir des éléments et des outils concrets de réduction de cette vulnérabilité. La conservation d'une diversité structurale et spécifique au sein des systèmes cultivés est une partie de la solution (Ngo Bieng *et al.*, 2022a). Par mon intégration durant huit ans dans une UMR d'agronomie, j'ai acquis des compétences et connaissances en agronomie générale et en agroforesterie tropicale en particulier. Cette expérience et ces compétences en agroécologie m'ont permis de mettre en pratique mes travaux de recherche au service des thématiques scientifiques prioritaires du Cirad en relation avec l'intensification écologique des systèmes cultivés et la vulnérabilité des systèmes tropicaux ; et d'avoir des perspectives pour participer à la conception et au co-développement de territoires tropicaux forestiers durables, dans une logique incluant une durabilité agroécologique.

Mes travaux de recherche sont clairement orientés vers la connaissance des processus de maintien d'une diversité structurale et biologique au sein des communautés végétales. Ils me permettent d'envisager les voies de maintien de cette diversité, avec l'objectif d'améliorer les performances résultantes, et la provision de services écosystémiques, notamment environnementaux. Mon affectation en Amérique centrale et l'application de mes travaux de recherche aux systèmes agroforestiers tropicaux productifs m'a permis de me rendre compte de l'extrême vulnérabilité de ces services environnementaux. Elle m'a aussi permis de me rendre compte de la dépendance (spatiale notamment) et de la proximité entre ces systèmes productifs et les systèmes forestiers naturels. Le développement de ces systèmes productifs, en Amérique centrale comme plus généralement sous les tropiques impacte négativement le maintien d'une diversité structurale et biologique au sein des territoires forestiers de l'Anthropocène.

J'ai alors mis en place une évolution scientifique qui a conduit à mon projet de recherche actuel. L'étude des voies de conservation ou de récupération de services écosystémiques par le biais d'une mobilisation d'éléments de la diversité biologique et structurale des individus arbres dans des écosystèmes végétaux hétérogènes m'a conduit à mettre la problématique «restauration» au centre de mes intérêts de recherche. Ma préoccupation scientifique était de mettre à profit mes compétences et expériences acquises pour réduire la vulnérabilité des écosystèmes forestiers tropicaux. Les connaissances fines issues des analyses de structure et de diversité que j'applique dans mes recherches sont des éléments pouvant donner des pistes pour le maintien et la restauration d'une diversité de performances et services écosystémiques dans des systèmes forestiers tropicaux vulnérables. Pour donner de l'envergure à cette évolution scientifique, je me suis insérée aux activités, terrains et réseaux de recherche pertinents pour l'essor de cette thématique dans mon projet de recherche. J'ai mis en place un projet de mobilité interne au Cirad qui s'est conclu en début 2017 par mon affectation à l'UR Forêts et Sociétés. J'ai retrouvé alors mon terrain originel, les forêts, et cette fois-ci en milieu tropical, où j'ai commencé à développer mon projet actuel de recherche.

3 Projet de recherche et d'encadrements

Mon actuel projet de recherche au sein de l'UR F&S porte sur l'évaluation et la récupération de la biodiversité et des services écosystémiques dans les systèmes forestiers naturels de l'anthropocène. Mes travaux ont pour objectif de fournir des connaissances sur le fonctionnement des systèmes forestiers tropicaux, dans des contextes de déclin de biodiversité, de fragmentation, d'exploitation forestière, de changements globaux et climatiques, qui caractérisent l'anthropocène (Malhi *et al.*, 2014; Roberts *et al.*, 2018; Edwards *et al.*, 2019). Mon approche tire profit de mes expériences de recherche précédentes présentées (section 2. Résumé de mon parcours de recherche). Sur la base de fines analyses de structure et de composition, j'accède à des particularités de fonctionnement des peuplements hétérogènes, et aux processus écologiques et anthropiques sous-jacents. J'accède aussi à des performances particulières, qui me permettent d'évaluer des services écosystémiques d'intérêt (à l'exemple de la productivité ou de la régulation des bioagresseurs dans le cadre de mes travaux de recherches présentés précédemment). Mon approche de recherche a cependant évolué, pour s'adapter à des systèmes plus divers impliquant une diversité de services environnementaux, avec l'objectif de promouvoir sur des bases scientifiques cette diversité comme gage de résilience dans un contexte d'extrême vulnérabilité. Dans le cadre de mes recherches actuelles et futures, je m'intéresse principalement à deux propriétés dont je veux pouvoir comprendre la dynamique : la biodiversité d'un système forestier, spécifiquement en arbres forestiers ; et la biomasse, spécifiquement son accumulation (mitigation du changement climatique). Mes travaux de recherche visent alors à définir dans quelles conditions les propriétés ou les services écosystémiques étudiés sont favorisés ou sont en état de vulnérabilité, et le cas échéant quelles actions pourraient être mises en place pour réduire la vulnérabilité ou appuyer la dynamique de récupération naturelle.

Au Cirad, ma thématique de recherche s'inscrit dans deux des six thématiques de recherche prioritaires : (i) « biodiversité comme levier de développement et de résilience », et notamment son sous-thème « concilier production et conservation des écosystèmes » ; et (ii) « changement climatique notamment les stratégies d'adaptation, et d'atténuation à travers la diminution des émissions de gaz à effet de serre, sans compromettre les opportunités de développement ni creuser les inégalités ». Au sein de l'UR F&S, mes travaux se situent dans l'orientation de recherche « services écosystémiques », qui vise à évaluer la capacité des forêts tropicales à fournir durablement des services écosystémiques face aux changements globaux.

Les forêts tropicales de l'anthropocène constituent l'objet d'étude de mon projet de recherche. Le domaine forestier tropical représente 45 % des forêts mondiales, s'étendant sur 18 millions de km² (FAO, 2020). Ces écosystèmes se distinguent par le nombre exceptionnel d'espèces qu'ils abritent

(Gibson *et al.*, 2011), plus de 60 % de toutes les espèces connues sur seulement 7 % de la surface terrestre. Elles constituent par conséquent des hot spots de biodiversité (Myers *et al.*, 2000). Au-delà de leur valeur intrinsèque, ces niveaux élevés de biodiversité sont liés à la fourniture de services écosystémiques vitaux (Brockerhoff *et al.*, 2017). Par exemple, dans leur biomasse aérienne, les forêts tropicales représentent environ 55 % des stocks de carbone forestier dans monde. Ce stockage considérable de carbone leur confère une place cruciale dans le cycle mondial du carbone et dans la régulation des processus climatiques.

Cependant, les forêts tropicales, qui sont des écosystèmes cruciaux, sont extrêmement vulnérables. Depuis les années 1920, la majeure partie de la déforestation a eu lieu dans les pays tropicaux. Entre 2010 et 2020, la superficie totale des forêts tropicales a disparu à un rythme moyen énorme de 13 millions d'hectares par an (FAO, 2020; Vancutsem *et al.*, 2021). Les forêts anciennes ne représentent plus que 25 à 30 % de toutes les forêts tropicales existantes et la plupart des forêts tropicales sont considérablement modifiées, secondaires ou dégradées (Ngo Bieng *et al.*, 2021).

La perte de zones forestières au cours des décennies de déforestation dans les tropiques est principalement due au développement agricole, notamment à l'agriculture itinérante et à la déforestation axée sur les produits de base, qui ont entraîné le défrichement de millions d'hectares de forêt primaire (Pendrill *et al.*, 2022). Les pratiques d'exploitation forestière non durables dans les régions tropicales sont également une cause indirecte de déforestation, en facilitant l'accès à la forêt et sa colonisation, et en encourageant la conversion des forêts dégradées vers des utilisations de terres plus rentables à court terme : agriculture, pâturages, plantations industrielles et exploitation minière (Ngo Bieng *et al.*, 2022b).

Spécifiquement en rapport avec l'exploitation forestière qui est un thème important de la recherche forestière, son implémentation non durable dans les forêts tropicales matures a augmenté en raison de la demande croissante de bois tropical, entraînant une dégradation des forêts (Malhi *et al.*, 2014; Ngo Bieng *et al.*, 2021). Cependant, les forêts tropicales naturelles (intactes ou non) restent la principale source actuelle de bois aujourd'hui.

Dans ce contexte actuel critique de l'anthropocène, caractérisé par un schéma de dégradation/déforestation dans les tropiques, mes axes de recherche ont l'ambition d'apporter des connaissances sur deux principales questions relatives aux systèmes forestiers naturels perturbés (non intacts, y compris secondaires et dégradés) :

(i) quelles sont leurs particularités de structure et de fonctionnement ? L'objectif est de définir des états initiaux réalistes de la diversité de peuplement forestiers de l'anthropocène. Comme dans le cadre de mes travaux de thèse, ces états initiaux, en plus de fournir des connaissances sur la structure et la diversité des systèmes étudiés, sont l'étape initiale de perspectives de modélisation de la dynamique de ces peuplements hétérogènes (Ngo Bieng *et al.*, 2011).

(ii) sur la base de différents états initiaux, quelles sont leurs trajectoires de récupération de la biodiversité et des services écosystémiques associés ?

Pour répondre à ces questions, je mets en place et développe des compétences/de l'expertise en écologie générale, en écologie des communautés forestières tropicales, en statistiques et en modélisation de systèmes complexes. Je maintiens également une interaction continue avec les étudiants et jeunes chercheurs sur ces axes de recherche.

3.1 Axe 1 : quelles sont les particularités de structure et de fonctionnement des systèmes forestiers naturels de l'anthropocène, y compris secondaires et dégradés

Une synthèse des travaux du Cirad sur les forêts tropicales souligne la nécessité de prendre en compte la diversité de situations des forêts tropicales pour envisager des pratiques adéquates de gestion durable permettant de sauvegarder les forêts tropicales existantes³. Pour répondre à cette nécessité, j'ai l'ambition d'appliquer cet axe de recherche à différents écosystèmes forestiers, dont la situation de vulnérabilité locale (et globale) est effective. Connaître leur particularité de structure et de fonctionnement permet de cerner leurs dynamiques, les facteurs influençant et processus sous-jacents, et de mettre en place des projets de restauration adéquats. Mes recherches dans cet axe devront répondre à deux principales questions pour les systèmes étudiés : (i) quels sont les facteurs structuraux associés à une vulnérabilité accrue de ces systèmes dans les contextes étudiés ? (ii) quels sont les processus naturels ou anthropiques sous-jacents ?

Dans le contexte de mon affectation en Amérique centrale et en collaboration avec le CATIE, j'ai initié cet axe de recherche sur une diversité de systèmes forestiers tropicaux présentant une vulnérabilité effective.

3.1.1 Structure, composition et fonctionnement des systèmes forestiers de montagne

Sur cette thématique, j'ai collaboré à l'encadrement et co-publié avec trois étudiants du CATIE (exemple des stages de Master de Alba Lorena Hernandez et Wilson Zúniga Domínguez, sur la dynamique des forêts tropicales sur un gradient altitudinal). Je me suis aussi impliquée dans les actions de projets du CATIE sur les systèmes forestiers tropicaux de montagne (notamment le projet « Socioecological restoration of forests, landscapes and ecosystem services resilient to climate change »). En effet, Les systèmes forestiers de montagne (altitude > à 300masl) sont un exemple d'écosystèmes forestiers extrêmement vulnérables, aux pressions anthropiques et aux changements climatiques (Veintimilla *et al.*, 2019). En plus de permettre des actions de recherche pour comprendre la dynamique et le fonctionnement de ces systèmes dans des contextes anthropique et climatique contraignants, les écosystèmes de montagne constituent des laboratoires naturels pour comprendre à court terme la réponse des espèces ou des écosystèmes au changement climatique (Körner, 2007). Ils permettent l'analyse des rapides variations spatiales de la composition et de la structure des espèces en fonction des facteurs environnementaux qui les façonnent, notamment les gradients associés, altitudinal et de température (Veintimilla *et al.*, 2019).

Des premiers résultats obtenus en collaboration avec le CATIE sur la diversité des communautés végétales des forêts de montagne confirment que la composition est fortement impactée par le gradient de température, la biodiversité décroît de manière linéaire avec l'altitude (voir figure 15 l'exemple de la richesse spécifique) (Veintimilla *et al.*, 2019).

³ <https://www.cirad.fr/espace-presse/communiqués-de-presse/2023/le-cirad-s-engage-pour-l-avenir-des-forets-tropicales>

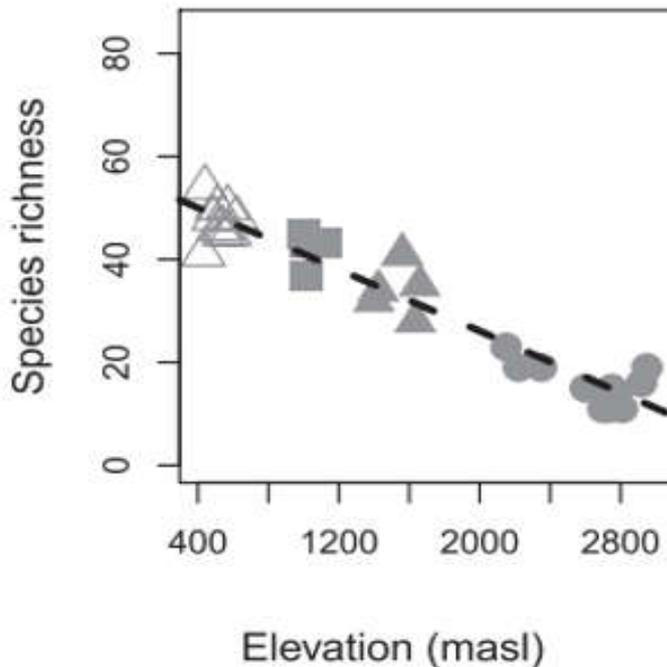


Figure 15 : Illustration de la relation linéaire entre richesse spécifique et altitude, les arbres, palmes et fougères sont pris en compte (Veintimilla *et al.*, 2019)

L'altitude, en interaction avec des facteurs édaphiques et spatiaux, conditionnent la composition des communautés végétales le long du gradient altitudinal, et mettent en évidence différents types forestiers, du bas vers le haut : forêt tropicale humide (la plus biodiversée, représentée sur la figure 15 par des triangles blancs) ; forêts humide de pré-montagne (carrés gris), forêt humide de basse montagne (triangles gris), et forêt humide de montagne (cercles gris). La vulnérabilité des forêts de montagne représente en fait une vulnérabilité de diverses communautés végétales, non similaires. Les espèces qui les constituent présentent des réponses variables au gradient altitudinal (et donc thermique). Dans le travail de stage de Master de Alba Lorena Hernandez, (Hernández Gordillo *et al.*, 2021), nous avons caractérisé la variabilité de processus dynamiques le long du gradient (régénération, croissance, mortalité). Nos recherches nous orientent alors vers des traits fonctionnels, permettant d'expliquer la variabilité de l'adaptabilité ou vulnérabilité thermique des différentes espèces. Mes futures recherches dans ce cadre s'intéresseront au processus de « thermofilization » par le biais du trait d'optimum thermique spécifique (Duque *et al.*, 2015; Fadrique *et al.*, 2018). L'optimum thermique est la préférence thermique ou niche thermique de l'espèce et représente la valeur moyenne des températures des plages géographiques où les individus de cette espèce sont rencontrés. Mon objectif sera de mettre en évidence des espèces « résilientes » thermiquement (tout en considérant les autres éléments expliquant leur présence plus importante sur le gradient altitudinal). De telles espèces pourraient être favorisées pour des actions de restauration des forêts de montagne (et des forêts tropicales en général), de manière à réduire leur vulnérabilité climatique dans un contexte de changement climatique.

3.1.2 Structure, composition et fonctionnement des systèmes forestiers tropicaux de production et secondaires.

Sur cette thématique, j'encadre la thèse de Maïri Souza Oliveira, j'ai également encadré son stage de Master et ses travaux d'expertise qui ont suivi. J'ai participé à l'encadrement de deux étudiants du CATIE, Maria Alejandra Chamorro et Ethewaldo Estrada. J'ai coordonné des actions de recherche du programme FTA pour le CATIE et le Cirad. Ces actions de recherche avaient pour objectif : d'évaluer le

potentiel commercial et la productivité en biomasse aérienne, et des premiers résultats sont publiés par Souza Oliveira *et al.* (2021).

Mon affectation en Amérique centrale et au CATIE a accentué mon intérêt pour les systèmes forestiers secondaires. Au Costa Rica par exemple, les différents écosystèmes forestiers, très fragmentés, occupent 52 % du territoire, dont un tiers sont des systèmes forestiers secondaires. En général, les forêts secondaires sont des écosystèmes forestiers dominants dans de nombreuses régions et paysages tropicaux (Poorter *et al.*, 2016). Ces écosystèmes forestiers sont associés à la fourniture de nombreux services environnementaux dans les paysages tropicaux (régulation hydrique, habitats d'importance critique qui préservent la biodiversité dans les paysages anthropisés, stockage du carbone dans la biomasse aérienne et souterraine, amélioration de la fertilité des sols). Cependant, en comparaison aux systèmes forestiers matures, ces écosystèmes ont perdu leur capacité à fournir un niveau élevé de biens et de services (Ngo Bieng *et al.*, 2021). Spécifiquement en ce qui concerne la disponibilité en bois d'œuvre (commercial), elle varie énormément dans les forêts secondaires matures qui sont en général plus pauvres en bois commercial que les forêts primaires (Souza Oliveira *et al.*, 2021). Les premiers stades de la dynamique des forêts secondaires sont alors particulièrement contraints, car caractérisés par une faible fertilité initiale des sols. L'ouverture de l'écosystème dans ces premiers stades de dynamique favorisent alors la régénération d'espèces à croissance rapide. Les forêts secondaires ont en plus les caractéristiques d'être situées dans des paysages soumis à la pression humaine, et sont plus vulnérables aux catastrophes naturelles et climatiques, telles que les ouragans ou les incendies.

A partir de données d'inventaires forestiers nationaux et de projets de recherche locaux au Costa Rica, et au Nicaragua, nous avons caractérisé les potentiels de stockage de biomasse aérienne dans des forêts secondaires. Nous avons spécifiquement évalué la biomasse issue de bois à potentiel commercial. L'idée est d'envisager les forêts secondaires comme sources alternatives de production de bois, pour réduire leur vulnérabilité au sein de paysages tropicaux productifs. La production de bois dans ces écosystèmes forestiers vise le double objectif de réduire la pression exercée par l'exploitation forestière sur les forêts matures et ainsi la dégradation et la déforestation qui en résultent ; mais aussi d'augmenter la productivité et la rentabilité des forêts secondaires qui disparaissent aux profits de systèmes agricoles plus rentables à court terme. Les premiers résultats obtenus (Souza Oliveira *et al.*, 2021) confirment que ces forêts secondaires présentent un potentiel très variable en terme de stockage de biomasse. Ce stockage varie en fonction de conditions climatiques et édaphiques. La figure 16 présente un résultat de l'article de Souza Oliveira *et al.* (2021) : les forêts secondaires du Costa Rica accumulent plus de biomasse que les forêts secondaires du Nicaragua, et les forêts secondaires des biomes humides accumulent plus de biomasse que celles des biomes secs.

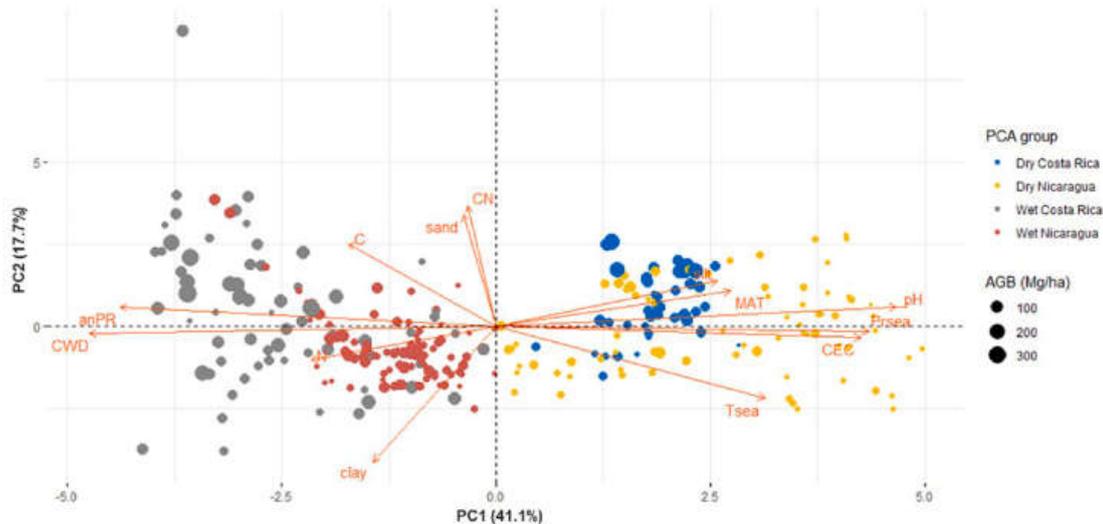


Figure 16 : Illustration de la variabilité de biomasse aérienne des arbres dans des parcelles de forêts secondaires au Costa Rica et au Nicaragua

La récupération de biomasse dans les forêts secondaires est influencée par une diversité de facteurs climatiques et édaphiques, mais aussi socio-économiques (différence entre le Costa Rica et le Nicaragua). Pour ce qui est du potentiel productif de ces forêts secondaires, nous avons réalisé une estimation d'espèces de bois d'œuvre dans les forêts secondaires étudiées. 34 % des espèces identifiées présentent un potentiel commercial, et contribuent pour plus de 80 % à la biomasse aérienne forestière. Les forêts secondaires ont un potentiel commercial qui doit être promu et sécurisé. Le CATIE a mis en place une expérimentation d'exploitation sélective en système forestier secondaire, qui est pionnière sous les tropiques (figure 17). Mes travaux de recherche participeront à identifier les facteurs structuraux et de composition associés à une dynamique forestière secondaire positive dans différents contextes. Cette dynamique doit permettre le maintien d'une diversité biologique et structurelle, mais doit aussi permettre d'améliorer le potentiel productif de ces systèmes (diversité d'espèces à potentiel commercial).



Figure 17 : Exploitation en forêts secondaires matures, d'environ 100ans, expérimentation du CATIE dans la zone de Turrialba au Costa Rica

En même temps que leur capacité de stockage de biomasse et facteurs associés, nous nous intéressons à leur potentiel en terme conservation de la biodiversité forestière, et facteurs associés. Dans le cadre de la thèse de Maïri Souza Oliveira, nous proposons alors de mettre en place méthode d'évaluation et de suivi de la biodiversité forestière (sur différents types de forêts) à large échelle spatiale, par une modélisation de la distribution des espèces (SDM) utilisant des prédicteurs issus de l'information spectrale satellitaire. Ce travail sera appliqué aux écosystèmes forestiers du Costa Rica, et nous évaluerons spécifiquement le potentiel des forêts secondaires pour conserver la biodiversité forestière globale du pays, et les facteurs associés à plusieurs échelles. Mes travaux de recherche incluront un intérêt particulier pour les espèces à bois d'œuvre, et l'identification des facteurs associés à leur présence et leur diversité.

Les résultats de cet axe contribueront à la compréhension de la structure et du fonctionnement et des facteurs de vulnérabilité des systèmes étudiés. La compréhension des mécanismes sous-jacents permettra de contribuer à envisager des scénarios et des pratiques adéquates de sylviculture durable permettant de planifier leur conservation, d'augmenter leur stabilité ou de réduire leur vulnérabilité dans les paysages tropicaux de l'anthropocène.

3.2 Axe 2 : quelles sont les trajectoires de récupération de la biodiversité et des services écosystémiques dans différents systèmes forestiers

En plus de la génération de connaissances sur les spécificités de structure et de fonctionnement de systèmes forestiers tropicaux et dans le contexte de l'anthropocène (construction d'états initiaux réalistes), un autre objectif important de mes travaux de recherche est de contribuer à fournir des bases scientifiques pour la mise en place des stratégies de restauration de la diversité et des services

écosystémiques associés dans les systèmes forestiers perturbés, en tenant compte de leur état initial, notamment de leur degré de perturbation, ou de leur potentiel de récupération naturelle.

Dans le contexte de la décennie de la restauration des écosystèmes (2021-2030) déclarée en 2019 par l'Assemblée générale des Nations unies⁴, il est souligné l'urgence nécessaire de prévenir, d'arrêter et d'inverser la dégradation des écosystèmes, et d'intensifier la restauration des écosystèmes dégradés et détruits dans le monde entier. Outre son importance pour les problèmes mondiaux tels que le réchauffement climatique et la perte de biodiversité, la restauration des écosystèmes dégradés est essentielle à la réalisation des objectifs de développement durable des Nations Unies. La restauration et la reforestation des terres dégradées sont alors incluses dans les accords de Paris, et dans différentes initiatives de restauration mondiales et régionales. Le défi de Bonn⁵ lancé en 2011 pour la restauration de 350 millions d'hectares de forêts d'ici à 2030, est l'un des principaux moteurs de ces initiatives. Le défi de Bonn est appuyé par des initiatives régionales de restauration, à l'exemple de l'Initiative 20*20 en Amérique latine⁶, dont le Cirad est l'un des partenaires techniques, partenaires dont l'objectif est de fournir des connaissances et des bases scientifiques pour des implémentations réussies de restauration des terres dégradées.

Une des approches pertinentes pour restaurer et reboiser les paysages forestiers dégradés est la restauration naturelle, ou passive (Chazdon and Guariguata, 2016). Pour des terres dégradées ou complètement déboisées après l'abandon de l'utilisation des terres, la restauration secondaire conduit aux forêts secondaires présentées dans l'axe 1 (figure 18).



Figure 18 : Illustration de dynamique forestière secondaire après abandon de zones pâturées, au Costa Rica

⁴ www.decadeonrestoration.org

⁵ www.bonnchallenge.org

⁶ <https://initiative20x20.org>

Le succès de la régénération naturelle dépend de facteurs agissant à deux échelles différentes. À l'échelle locale, le succès de la régénération naturelle est fortement influencé par de nombreux facteurs tels que la variabilité du climat local, les caractéristiques de dégradation sols, l'intensité et la fréquence des perturbations du peuplement d'origine, l'utilisation antérieure des terres, la végétation environnante, la disponibilité locale de semences, le pool régional d'espèces, etc. A l'échelle du paysage (autour du site dégradé), le succès de la régénération naturelle est influencé par la proximité d'arbres et de systèmes forestiers (source de semences externes), la qualité des usages de sol, la présence de faune, agent de dispersion des graines (Chazdon and Guariguata, 2016; Martínez-Ramos *et al.*, 2016).

La régénération naturelle des systèmes forestiers dégradés dans des zones caractérisées par les limitations biophysiques relatives aux facteurs mentionnés ci-dessus est donc un challenge. Dans les écosystèmes situés à proximité de paysages dominés par l'homme, où les processus de restauration naturelle peuvent prendre des décennies ou des siècles, des interventions humaines sont nécessaires pour surmonter les limitations biophysiques (Ngo Bieng *et al.*, 2021). La mise en œuvre d'une restauration active, i.e. d'actions sylvicoles visant à renforcer la dynamique tout en améliorant leurs attributs écosystémiques (souhaités) contribuerait alors à une récupération plus certaine de la biodiversité et des services écosystémiques associés. La restauration active, assistée, est une application directe de la restauration écologique (Jones *et al.*, 2018). Elle vise à accélérer l'établissement, la croissance et la survie des arbres dans les écosystèmes forestiers endommagés. La restauration active consiste principalement en des projets de plantation d'enrichissement, à partir de semis de pépinière ou de semis directs. Elle consiste également en : des traitements sylvicoles (éclaircies, cerclages par exemple), la protection des semis, la coupe de lianes, la protection des arbres forestiers restants dans le paysage, l'enlèvement ou la réintroduction de faune, l'élimination d'espèces nuisibles/invasives, le remodelage de la topographie, l'enlèvement ou l'amendement des sols, etc. (Ngo Bieng *et al.*, 2021). L'objectif est d'améliorer et de stimuler la récupération naturelle, accélérer l'assemblage des espèces dans les écosystèmes forestiers perturbés ou dégradés. Ces projets peuvent cependant être coûteux (en fonction des actions de restauration implémentées), et peuvent conduire à la mise en place de communautés végétales différentes en composition et en structure de la communauté originale (Crouzeilles *et al.*, 2016).

Il apparait alors que pour le cas de la dynamique secondaire, et plus généralement de la dynamique forestière post perturbation, les trajectoires naturelles de récupération, qui doivent influencer les stratégies de restauration, peuvent prendre diverses directions, sous l'influence de nombreux facteurs, dans des paysages tropicaux extrêmement dynamiques.

Dans ce cadre, cet axe de recherche contribuera à fournir des bases scientifiques pour une restauration efficace et durables des forêts tropicales, qui prend en compte les trajectoires de dynamique naturelle, et aussi les moteurs de déforestation/dégradation locaux et globaux.

Spécifiquement pour les systèmes forestiers tropicaux et dans ce cadre, les recherches répondront à deux principales questions : (i) quelles sont les trajectoires de récupération de la biodiversité et de services écosystémiques associés dans différents systèmes forestiers soumis à des perturbations de différentes intensités ? (ii) en fonction de ces trajectoires, quelles stratégies de restauration (actives ou passives) devraient être mise en place pour optimiser la dynamique de récupération de la biodiversité et services écosystémiques ?

Sur cette thématique, je dirige les thèses de Eliott Maurent et Cristina Vidal. J'ai également encadré les stages et travaux d'expertise de Leslie Morrison et Elodie Manca. Pour avoir une bonne vision des stratégies et challenges associés à la restauration des systèmes forestiers dans différents paysages tropicaux, j'ai proposé et coordonné le numéro spécial de la revue FEM « Active restoration of timber

production and other ecosystem services in secondary and degraded forests », où je co-signe différents articles avec des collègues, et des étudiants de Masters.

Dans le cadre de la thèse d'Eliott Maurent, nous caractériserions et de modélisons les trajectoires naturelles de récupération de la diversité végétale (arbres) dans des forêts tropicales d'Amérique latine. Maurent *et al.* (2023) propose un cadre mathématique pour modéliser ces trajectoires pour différents types de forêts tropicales, caractérisées par diverses intensité de perturbation (production et secondaires). Cette approche de modélisation est construite à partir de données provenant de deux réseaux de suivi à long terme de la dynamique forestière au Costa Rica (réseau OEFO) et en Guyane française (réseau TmFO). Au sein de ces deux réseaux, nous avons des premiers éléments de comparaison de la dynamique de forêts de production et secondaires. La figure 19 présente par exemple des trajectoires de récupération comparée entre forêts de production (exploitation au Costa Rica suivant des critères strictes de durabilité environnementale (Morrison Vila *et al.*, 2021)) et forêts secondaires.

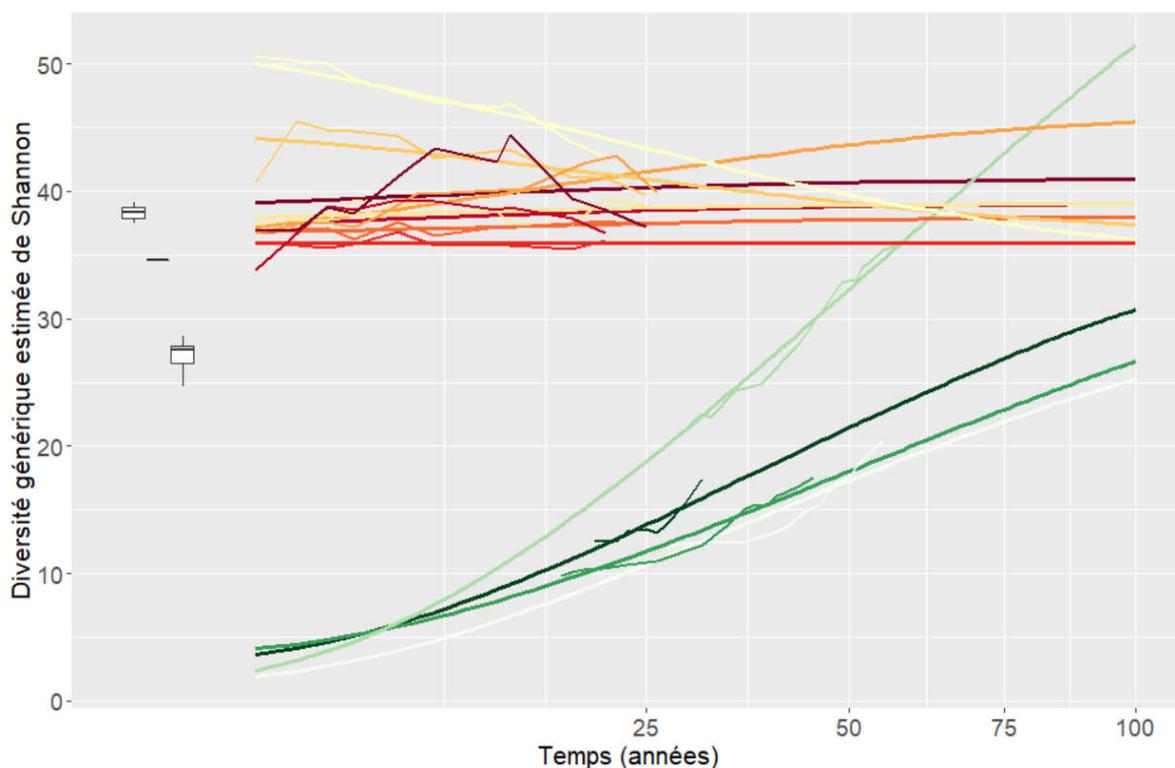


Figure 19 : Trajectoires de récupération estimées et modélisées de forêts de production (courbes au-dessus, gradient de l'orange au rouge foncé) et forêts secondaires (courbes en dessous, gradient de vert)

Il apparaît que les forêts semblent récupérer leur diversité taxonomique plus rapidement après exploitation (forêts de production durable) qu'après déforestation (dynamique secondaire après agriculture, coupe à blanc ou feu). Ces résultats confirment que dans des territoires forestiers tropicaux, la dynamique forestière secondaire est un challenge, et l'exploitation durable a du potentiel pour maintenir l'intégrité des forêts tropicales. Nous notons aussi sur l'ensemble des sites étudiés dans le cadre de la thèse d'Eliott Maurent, une grande variabilité dans les trajectoires de récupération. L'objectif est maintenant d'étudier les facteurs impliqués, anthropiques (intensités de perturbation) et environnementaux. La thèse d'Eliott Maurent étudie spécifiquement les trajectoires de récupération en fonction de facteurs liés à la perturbation. En perspective, mes futures recherches dans cet axe intégreront aussi les facteurs liés à (i) à la structure de chacune des parcelles (état initial), (ii) aux conditions environnementales (climatiques, édaphiques). Ces futures recherches intégreront de l'expérimentation et de la modélisation.

Le travail de stage de Master Leslie Morrison contribue aussi à cet axe. L'objectif ici est : (i) d'évaluer la récupération de biomasse aérienne après exploitation (durable) dans des parcelles de forêts de production et de forêts secondaires au Costa Rica ; et de (ii) comparer cette dynamique de récupération à la même dynamique en forêts matures non exploitées. Nous nous intéressons au processus de stockage de biomasse aérienne, car il détermine le potentiel en terme de service de régulation climatique, dans les forêts de production de l'anthropocène. Dans l'article Morrison Vila *et al.* (2021) où nous présentons les résultats pour les forêts de production, nous trouvons alors qu'une exploitation durable, telle que celle pratiquée dans les parcelles de forêts de production étudiées au Costa Rica conduit à une stimulation de la dynamique de récupération de biomasse aérienne, et nous identifions les facteurs environnementaux déterminant cette récupération naturelle de biomasse.

Enfin, dans le cadre de la thèse de Christina Vidal, nous étudions les trajectoires de récupération des formations végétales forestières impactées par les incendies, afin d'identifier leurs modalités de vulnérabilité, de résilience ou d'adaptation. Cette thèse est appliquée à la région du Chaco paraguayen, et me permet de travailler sur des formations végétales tropicales de biome sec et sur un important facteur de disparition des forêts tropicales de l'anthropocène, le feu. Nous analyserons alors dans un premier temps les dynamiques spatiales et temporelles des incendies dans la région étudiée, et évaluerons la sensibilité écologique de différents types de forêts soumises à différentes fréquences et intensités d'incendie.

Les résultats de cet axe contribueront à la compréhension du potentiel de récupération naturelle de biodiversité et services écosystémiques associés dans des forêts tropicales perturbées, en apportant un éclairage sur la diversité des trajectoires de récupération.

Comme pour l'axe 1 de caractérisation, je voudrais faire un focus sur un thème peu abordé : les trajectoires de récupération de la diversité et de la biomasse des espèces forestières à potentiel commercial. La présence de ces espèces permettrait le maintien de la valeur de ces forêts, ce qui diminuerait le risque de leur conversion vers d'autres usages du sol plus profitables à court terme (agriculture, élevage), et ainsi le risque d'érosion de la biodiversité forestière.

J'ai l'ambition par les connaissances produites de contribuer à la construction d'hypothèses « régionales » sur les dynamiques naturelles de récupération de diversité et de services écosystémiques données dans les parcelles de forêts matures, de production et secondaires, mais aussi de définir des stratégies de restauration appropriées au sein de ces systèmes perturbés, restauration naturelle (passive) ou assistée (active), en fonction des trajectoires de récupération identifiées.

Pour ce qui est de la restauration active, je voudrais enfin remobiliser le concept d'organisation spatiale des individus pour formuler et tester des hypothèses par simulation et expérimentation, permettant de concevoir et évaluer des systèmes forestiers restaurés innovants, en choisissant et optimisant des organisations spatiales des individus introduits pour restauration des parcelles, de manière à stimuler la récupération de biodiversité de services écosystémiques associés. Il s'agirait alors de mettre en place un projet d'ingénierie écologique, sur la base d'une optimisation spatiale des individus dans les systèmes restaurés, pour accélérer leurs dynamiques de restauration.

La conception de systèmes restaurés innovants, permettant de réduire la pression sur les écosystèmes forestiers tout en répondant à des demandes locales et globales, est un objectif clé d'une restauration durable des paysages forestiers tropicaux (Ngo Bieng *et al.*, 2022b). Cette axe de recherche s'intègre parfaitement dans la thématique scientifique : « restauration de paysages forestiers », de grande importance pour le Cirad qui est impliqué dans les différentes initiatives mondiales et régionales de restauration des paysages forestiers.

3.3 Projets de recherche intégrant les deux précédents axes : ConForMa et Climate Rush

Je voudrais finir la présentation du futur que j'envisage de mes travaux de recherche par la présentation de deux projets en cours de montage que je coordonne, et qui intègrent différents aspects des axes de recherche 1 et 2 présentés. Ces projets solliciteront diverses expériences et compétences que j'ai acquises, et seront un cadre important de mes futures interactions académiques (formation, encadrement). Il s'agit des projets ConForMa et Climate Rush.

3.3.1 ConForMa : vers la gestion concertée forestière du futur : exemple de la gestion forestière communautaire

Dans un contexte de disparition alarmante de forêts tropicales mégadiverses qui jouent un rôle vital dans la régulation du climat et de l'hydrosphère au niveau mondial, une autre conséquence dramatique est que le bien-être des populations rurales, qui dépendent des ressources naturelles et agricoles, y compris les communautés locales et les cultures indigènes, est de plus en plus menacé. Mon intérêt pour les communautés humaines forestières est né lors de mon implication dans la co-rédaction et la co-communication sur - le livre de l'UR F&S : « Vivre avec les forêts tropicales ». Cet intérêt a pris de l'ampleur, avec mon affectation au Guatemala, en octobre 2021.

En effet, le Guatemala est un exemple typique de pays tropical, présentant des contextes économique, social, écologique et climatique critiques. Il est aussi situé sur une région connue comme hébergeant une importance biodiversité (Dinerstein *et al.*, 1995). Le nord Guatemala (département du Petén) héberge notamment une partie de la Selva Maya, qu'elle partage avec les pays voisins : Belize et Mexique. La Selva Maya est le plus grand des cinq derniers massifs forestiers d'Amérique centrale, qui constituent un corridor clé de biodiversité naturelle entre l'Amérique du nord et du sud. Cette forêt représente ainsi l'un des écosystèmes forestiers les plus importants à l'échelle régionale et mondiale. C'est la plus grande forêt tropicale en Mésoamérique, avec une surface de zones protégées qui dépasse quatre millions d'hectares. Cette forêt est caractérisée par un important patrimoine culturel et naturel. En ce qui concerne son patrimoine naturel, cette forêt héberge une immense biodiversité, sert de corridors écologiques et d'habitat pour de nombreuses espèces emblématiques de la flore et de la faune, y compris des espèces menacées comme le Jaguar (*Panthera onca*) ou le Tapir (*Tapirus* sp.). Cette forêt est enfin caractérisée par un important patrimoine culturel (figure 20). Elle abrite ce qui était le cœur de la civilisation Maya pendant la période classique (250-950 après J.-C.), et de nombreuses grandes villes abandonnées au 9^e siècle après J.-C., telles que Tikal ou El Mirador, classées au patrimoine mondial de l'UNESCO. Ces vestiges illustrent la richesse culturelle exceptionnelle de la région, mais ajoutent un défi supplémentaire en termes de conservation : la double nécessité de conservation des patrimoines naturels et culturels.



Figure 20 : Photo d'un temple Maya, s'élevant au-dessus de la canopée de la selva Maya, zone du parc national de Tikal

Ce double défi est en accord total avec le nouveau Cadre mondial pour la biodiversité post-2020 (Erdelen, 2020) : un objectif essentiel (objectif 3) étant de « maintenir au moins 30 % [...] des zones naturelles [...] en mettant l'accent sur les zones particulièrement importantes pour la biodiversité et les services écosystémiques associés [...] par le biais de systèmes de zones protégées [...] mais aussi de stratégies de [...] conservation efficace [...] y compris les zones conservées par les peuples autochtones et les communautés locales ». Mon expérience récente au Guatemala m'emmène à penser que les concessions forestières situées dans la Selva Maya au Guatemala sont un exemple de stratégie de conservation efficace, liée à l'action de communautés autochtones. Ces concessions forestières ont participé à freiner la déforestation et la dégradation des écosystèmes forestiers au sein de la Selva Maya (figure 21). Les concessions forestières au Guatemala sont alors données comme exemple pantropical de gestion forestière concertée réussie, spécifiquement communautaire.

Cependant, l'avenir du modèle de communautés forestières du Petén au Guatemala est menacé par l'évolution des contextes politiques, l'insécurité foncière, le changement climatique, et la nécessité d'améliorer la conservation du patrimoine archéologique. L'association des communautés forestières du Petén (ACOFOP) veut en conséquence s'appuyer sur une collaboration scientifique de haut niveau pour innover dans l'implémentation du modèle communautaire. Le Cirad, l'ACOFOP et des partenaires locaux (CATIE, RFA, CEMCA, FCCF, ATIBT) sont ainsi dans un processus de co-construction d'actions de recherche et développement avec la problématique plus globale d'appuyer une gestion forestière communautaire (GFC) innovante adaptée aux contextes de pression croissante sur les systèmes forestiers, de changement climatique, et intégrée au sein de territoires gérés de manière concertée. Cette collaboration est à l'origine du projet ConForMA, dont des actions ont été soumises à la « Forest and Communities Initiative » de la Fondation Albert 2 de Monaco ; et au Fond français pour l'environnement mondial (FFEM). Ce projet a deux grands objectifs : (i) mettre en place une GFC innovante en accord avec les communautés forestières de la Selva Maya, et qui répond aux défis actuels ; (ii) développer un réseau intertropical multidisciplinaire et pluri-acteurs pour améliorer et partager le concept de GFC innovante.

Ces objectifs sollicitent diverses compétences que j'ai acquises et intègrent plusieurs de mes problématiques de recherche, en relation avec la compréhension fine du fonctionnement de systèmes forestiers sous pressions anthropiques et climatiques, et la mise en place de stratégies adéquates de préservation et de restauration de la biodiversité et services écosystémiques associés. Ces objectifs me permettent en plus d'acquérir des compétences, en touchant à des thématiques cruciales pour le maintien de systèmes forestiers dans les paysages forestiers de l'anthropocène, notamment : la gestion inclusive des ressources forestières (relation au genre, aux populations autochtones minoritaires) ; la prise en compte des produits forestiers non ligneux et leur potentiel productif (relation à la sécurité alimentaire) ; l'interaction transdisciplinaire entre connaissances autochtones/ locales et connaissances scientifiques.

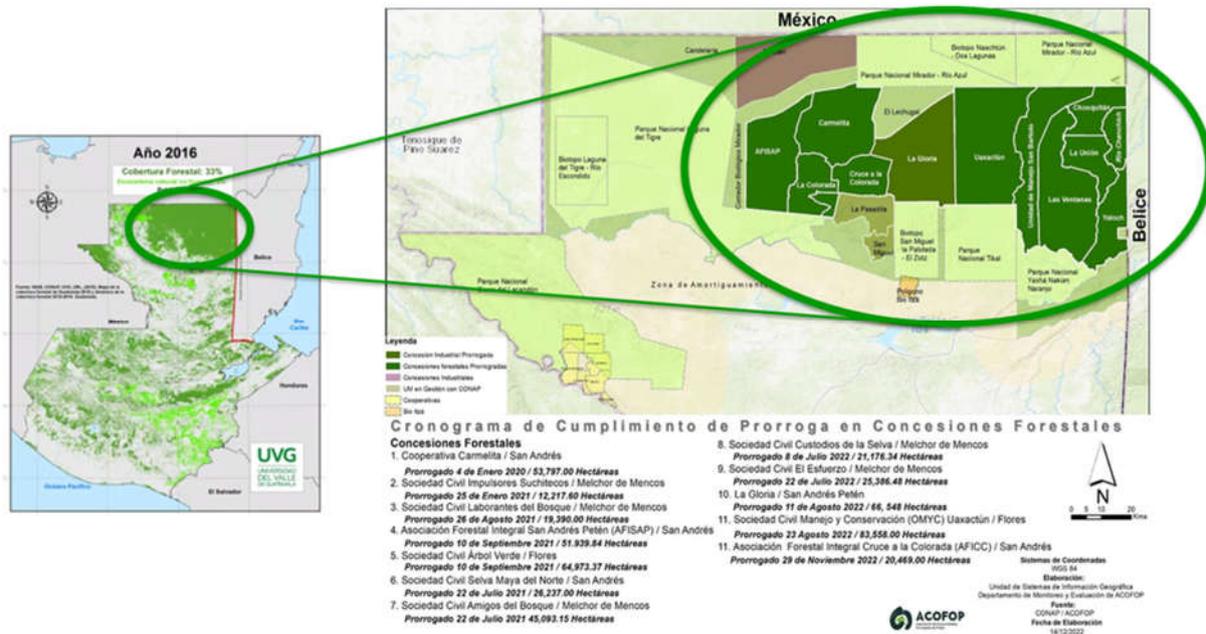


Figure 21 : Carte de la couverture forestière au Guatemala en 2016 (à droite), avec une couverture plus importante au Nord-est, qui correspond à la présence des concessions forestières du Petén

3.3.2 Climate Rush : un jeu sérieux pour communiquer sur l'extrême vulnérabilité des forêts tropicales au changement climatique

L'objectif de ce projet est de développer un jeu, Climate Rush, pour alerter de manière efficace et alternative notre société sur la vulnérabilité des forêts tropicales aux scénarios de réchauffement climatique modélisés par le GIEC. En effet, les changements climatiques, et spécifiquement le réchauffement planétaire, impactent notre planète et ses différents écosystèmes à l'exemple des forêts tropicales, mon objet de recherche. Ces forêts disparaissent à un rythme alarmant depuis plusieurs décennies et divers écosystèmes forestiers tropicaux font partie de la liste rouge des écosystèmes en danger construite par l'IUCN. Le dernier rapport de la FAO sur l'état des ressources forestières mondiales (FAO, 2020) montre que le feu est la principale cause de disparition des forêts, avec des déterminismes anthropiques (changement d'usage de sol au profit de systèmes agricoles non durables) et climatiques (événements catastrophiques, incendies non contrôlés, longues périodes de sécheresse, etc.).

Dans un contexte déjà critique pour nos forêts tropicales, les évolutions de température planétaires prévues par le GIEC vont impacter encore plus leurs communautés végétales. Mes premiers résultats de recherche (en collaboration avec le CATIE, axe 1) au Costa Rica ont évalué des optimums de température pour différentes espèces présentes dans les forêts tropicales mésoaméricaines. Ces espèces ont des optimums de température qui seraient largement dépassés selon les différents scénarios climatiques. La majorité des espèces d'arbres de ces forêts tropicales serait alors inadaptée

aux températures futures, ce qui accentuerait le déclin de biodiversité des forêts tropicales, et la disparition de services écosystémiques associés.

Le projet Climate Rush est né du constat qu'il est urgent que ces informations cruciales soient disponibles autrement que dans des rapports et articles qui ne sont malheureusement pas accessibles à la grande majorité de la population mondiale.

Pour cela, je propose de passer par un jeu sérieux éducatif. Dans le cadre de ce projet et sur la base d'un prototype de jeu déjà disponible⁷(illustré en figure 22), je propose de concevoir :

- un outil de communication innovant : un jeu de société sous un format de jeu de plateau à destination du grand public, commercialisé via un partenaire industriel, avec une stratégie co-construite, adaptée et attractive.

- une innovation pédagogique : la structuration d'une offre de prestation regroupant sur la base du jeu de société des actions d'information, de sensibilisation, de formation et de négociation orientées vers une diversité de publics (scolaires, académiques, partenaires de recherche, spécifiquement au Sud).

Ce projet de communication et pédagogie innovante est basé sur des résultats issus de mes diverses expériences de recherche, par exemple :

Illustration de la diversité végétale des forêts tropicales

Le jeu consiste à maintenir l'intégrité d'une forêt (ou d'une communauté végétale), qui est constituée d'arbres de différentes espèces. Dans le jeu, les espèces sont représentées par des figurines et des cartes (carte d'identité de l'espèce) qui donnent quelques caractéristiques de l'espèce, son nom scientifique, sa répartition géographique, son usage, son état de vulnérabilité, etc.

Adaptabilité et vulnérabilité spécifiques

Les différentes espèces d'arbres présentent aussi des degrés différents de vulnérabilité aux augmentations des températures prédites. Cette variabilité de vulnérabilité est matérialisée par différents optimums thermiques issus de mes recherches au CATIE (Hernández Gordillo *et al.*, 2021). Dans le jeu, l'optimum thermique est présenté comme la moyenne de température pour laquelle l'espèce se sent bien : naît, grandit et se reproduit. Loin de cet optimum thermique, les arbres de l'espèce souffrent, grandissent et se reproduisent moins bien, et peuvent, à long terme, disparaître. Les joueurs et joueuses, appelés citoyens et citoyennes dans les jeux, sont appelés à mettre en œuvre leurs connaissances, mais aussi les stratégies de réduction et d'adaptation proposées par le GIEC, pour augmenter la résilience de leur communauté végétale au changement climatique. Le jeu simule ainsi l'adaptation, ou la vulnérabilité climatique d'espèces tropicales, à travers des connaissances générées par mes travaux de recherche en collaboration.

⁷ <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/la-31e-edition-de-la-fete-de-la-science-sera-placee-sous-le-theme-du-changement-climatique-85778>



Figure 22 : Le prototype 1 du jeu ClimateRush présenté à la fête de la science 2022, faculté d'éducation et zoo du Lunaret, à Montpellier. <https://www.fetedelascience.fr/les-arbres-et-les-forets-tropicales-face-au-changement-climatique-comment-resister-comment-s>

Ce projet implique à ce jour des interactions avec deux étudiants, Clément Thion (stagiaire M1 BEE BIOGET que j'encadre) sur le thème : « développement d'un jeu sérieux permettant des actions de formation et de médiation sur la vulnérabilité des forêts tropicales au changement climatique » ; et Cristina Vidal (dont je dirige la thèse) sur le thème : « caractérisation de la résilience de la végétation post-incendie dans le chaco humide paraguayen ».

Ce projet a l'ambition de positionner la recherche au Cirad comme actrice sociétale de culture scientifique, et je crois que c'est aussi un des rôles de la recherche. La connexion entre sciences et sociétés est depuis ma thèse un moteur essentiel de la génération de connaissances. En plus de valoriser mes résultats de recherche, ce projet m'offre la perspective d'acquérir des compétences nouvelles dans l'élaboration de jeux sérieux éducatifs et la modélisation d'accompagnement (où il s'agit de mettre en discussion les processus de décision collective en lien avec des problématiques environnementales). Cette stratégie a selon moi du potentiel pour renforcer l'impact sociétal de la recherche.

4 Conclusion

Sur la base de mes expériences de recherche et des compétences acquises, les différents axes de recherche donneront des pistes pour :

- la compréhension des facteurs de vulnérabilité des systèmes forestiers tropicaux, tout en précisant les particularités de leur dynamique dans un contexte de pressions anthropiques et climatiques. J'ai ainsi l'ambition de mettre en place une recherche en ingénierie écologique appliquée, dont les

connaissances générées contribueront à la mise en place de pratiques adéquates de sylviculture durable, permettant de participer à la conservation et à la restauration de ces écosystèmes en déclin, en augmentant leur stabilité ou en réduisant leur vulnérabilité dans les paysages tropicaux de l'anthropocène.

- la construction d'hypothèses « régionales » sur les trajectoires naturelles de récupération de diversité et de services écosystémiques dans des parcelles de forêts matures, de production et secondaires. Ces hypothèses permettront de définir des plans de restauration spécifiques pour ces systèmes perturbés, restauration naturelle (passive) ou assistée (active) en fonction d'états initiaux finement caractérisés.

J'ai aussi l'ambition de pratiquer une science engagée en faveur des populations humaines forestières vulnérables au Sud, et qui fournit des outils permettant d'alimenter la culture scientifique de la société. Dans ce cadre, et cela s'applique aussi aux interactions que je souhaite avoir avec mes futures étudiantes et étudiants, je voudrais que mes travaux de recherche participent à mettre en place une foresterie « attractive », qui intègre les problématiques et les défis locaux et globaux : la prépondérance de systèmes secondaires et dégradés, l'intégration des communautés autochtones et vulnérables, la nécessité de rentabilité économique participant au bien-être local, la prise conscience de l'aspect vital des services écosystémiques et humains rendus par les forêts.

Dans ce cadre, l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches traduit une reconnaissance de ma capacité à encadrer et à superviser de jeunes chercheuses et chercheurs, et à maîtriser une stratégie de travaux de recherche pour la conservation, la gestion durable et la restauration des forêts tropicales à long terme. C'est dans ce contexte et sur ces critères que j'ai présenté ma candidature pour une HDR de l'Université de Paris Saclay, associée à l'ED ABIES.

5 Références

- Akoutou Mvondo, E., Ndo, E.G.D., Ngo Bieng, M.-A., Ambang, Z., Bella, M., Cilas, C., Tsouga Manga, M.L., Bidzanga Nomo, L., 2019. Assessment of the interaction between the spatial organization of citrus trees populations in cocoa agroforests and Phytophthora foot rot disease of citrus severity. *Agroforestry Systems* 93, 493-502.
- Alley, T.R., 1982. Competition theory, evolution, and the concept of an ecological niche. *Acta Biotheoretica* 31, 165-179.
- Álvarez, F., Casanoves, F., Suárez, J.C., Rusch, G.M., Ngo Bieng, M.A., 2023. An assessment of silvopastoral systems condition and their capacity to generate ecosystem services in the Colombian Amazon. *Ecosystems and People* 19, 2213784.
- Avelino, J., Ten Hoopen, G.M., DeClerck, F., 2011. Ecological mechanisms for pest and disease control in coffee and cacao agroecosystems of the neotropics. In: Rapidel Bruno, D.F.L.C.J.-F.B.J. (Ed.), *Ecosystem services from agriculture and agroforestry : measurement and payment*. Earthscan Publications, Londres, Royaume-Uni, pp. 91-117.
- Babin, R., Ten Hoopen, G.M., Cilas, C., Enjalric, F., Yédé, Gendre, P., Lumaret, J.P., 2010. Impact of shade on the spatial distribution of *Sahlbergella singularis* in traditional cocoa agroforests. *Agricultural and Forest Entomology* 12, 69-79.
- Baptiste, B., Pinedo-Vasquez, M., Gutierrez-Velez, V.H., Andrade, G.I., Vieira, P., Estupiñán-Suárez, L.M., Londoño, M.C., Laurance, W., Lee, T.M., 2017. Greening peace in Colombia. *Nature Ecology & Evolution* 1, 0102.
- Batista, J.L.F., Maguire, D.A., 1998. Modeling the spatial structure of tropical forests. *Forest Ecology and Management* 110, 293-314.
- Brockerhoff, E.G., Barbaro, L., Castagneyrol, B., Forrester, D.I., Gardiner, B., González-Olabarria, J.R., Lyver, P.O.B., Meurisse, N., Oxbrough, A., Taki, H., Thompson, I.D., van der Plas, F., Jactel, H., 2017. Forest biodiversity, ecosystem functioning and the provision of ecosystem services. *Biodiversity and Conservation* 26, 3005-3035.
- Chave, M., Tchamitchian, M., Ozier-Lafontaine, H., 2014. Agroecological Engineering to Biocontrol Soil Pests for Crop Health. In: OzierLafontaine, H., LesueurJannoyer, M. (Eds.), *Sustainable Agriculture Reviews 14: Agroecology and Global Change*, pp. 269-297.
- Chazdon, R.L., Guariguata, M.R., 2016. Natural regeneration as a tool for large-scale forest restoration in the tropics: prospects and challenges. *Biotropica* 48, 716-730.
- Cressie, N.A.C., 1993. *Statistics for Spatial Data*, Revised Edition.
- Crouzeilles, R., Curran, M., Ferreira, M.S., Lindenmayer, D.B., Grelle, C.E.V., Rey Benayas, J.M., 2016. A global meta-analysis on the ecological drivers of forest restoration success. *Nature Communications* 7.
- Dinerstein, E., Olson, D.M., Graham, D.J., Webster, A.L., Primm, S.A., Bookbinder, M.P., Ledec, G., 1995. *A Conservation Assessment of the Terrestrial Ecoregions of Latin America and the Caribbean*. The World Bank.
- Duque, A., Stevenson, P.R., Feeley, K.J., 2015. Thermophilization of adult and juvenile tree communities in the northern tropical Andes. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112, 10744-10749.

Edwards, D.P., Socolar, J.B., Mills, S.C., Burivalova, Z., Koh, L.P., Wilcove, D.S., 2019. Conservation of Tropical Forests in the Anthropocene. *Current Biology* 29, R1008-R1020.

Erdelen, W.R., 2020. Shaping the Fate of Life on Earth: The Post-2020 Global Biodiversity Framework. *Global Policy* 11, 347-359.

Fadrique, B., Báez, S., Duque, Á., Malizia, A., Blundo, C., Carilla, J., Osinaga-Acosta, O., Malizia, L., Silman, M., Farfán-Ríos, W., Malhi, Y., Young, K.R., Cuesta C, F., Homeier, J., Peralvo, M., Pinto, E., Jadan, O., Aguirre, N., Aguirre, Z., Feeley, K.J., 2018. Widespread but heterogeneous responses of Andean forests to climate change. *Nature* 564, 207-212.

FAO, 2020. Global Forest Resources Assessment 2020: Main report. . In, Rome, Italy, p. 184p.

Genet, A., Grabarnik, P., Sekretenko, O., Pothier, D., 2014. Incorporating the mechanisms underlying inter-tree competition into a random point process model to improve spatial tree pattern analysis in forestry. *ECOLOGICAL MODELLING* 288, 143-154.

Gibson, L., Lee, T.M., Koh, L.P., Brook, B.W., Gardner, T.A., Barlow, J., Peres, C.A., Bradshaw, C.J.A., Laurance, W.F., Lovejoy, T.E., Sodhi, N.S., 2011. Primary forests are irreplaceable for sustaining tropical biodiversity. *Nature* 478, 378-381.

Gidoïn, C., 2013. Relations entre structure du peuplement végétal et bioagresseurs dans les agroforêts à cacaoyers. Application à trois bioagresseurs du cacaoyer : la moniliose. In. Montpellier SupAgro Centre international d'études supérieures en sciences agronomiques, Montpellier, France, p. 208.

Gidoïn, C., Avelino, J., Deheuvels, O., Cilas, C., Bieng, M.A.N., 2014a. Shade Tree Spatial Structure and Pod Production Explain Frosty Pod Rot Intensity in Cacao Agroforests, Costa Rica. *Phytopathology*[®] 104, 275-281.

Gidoïn, C., Babin, R., Bagny Beilhe, L., Cilas, C., ten Hoopen, G.M., Bieng, M.A.N., 2014b. Tree Spatial Structure, Host Composition and Resource Availability Influence Mirid Density or Black Pod Prevalence in Cacao Agroforests in Cameroon. *PLOS ONE* 9, e109405.

Goreaud, F., 2000. Apports de l'analyse de la structure spatiale en forêt tempérée à l'étude et la modélisation des peuplements complexes. PhD thesis.

Goreaud, F., Loreau, M., Millier, C., 2002. Spatial structure and the survival of an inferior competitor: a theoretical model of neighbourhood competition in plants. *Ecological Modelling* 158, 1-19.

Goreaud, F., Péliissier, R., 2003. Avoiding misinterpretation of biotic interactions with the intertype K12-function: population independence vs. random labelling hypotheses. *Journal of Vegetation Science* 14, 681-692.

Hernández Gordillo, A.L., Vilchez Mendoza, S., Ngo Bieng, M.A., Delgado, D., Finegan, B., 2021. Altitude and community traits explain rain forest stand dynamics over a 2370-m altitudinal gradient in Costa Rica. *Ecosphere* 12, e03867.

Holt, R.D., 2009. Bringing the Hutchinsonian niche into the 21st century: Ecological and evolutionary perspectives. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106, 19659-19665.

Hubbell, S.P., 2005. Neutral theory in community ecology and the hypothesis of functional equivalence. *Functional Ecology* 19, 166-172.

Hutchinson, G.E., 1957. Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symp.* In, pp. 415–427.

Jones, H.P., Jones, P.C., Barbier, E.B., Blackburn, R.C., Rey Benayas, J.M., Holl, K.D., McCrackin, M., Meli, P., Montoya, D., Mateos, D.M., 2018. Restoration and repair of Earth's damaged ecosystems. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 285, 20172577.

Körner, C., 2007. The use of 'altitude' in ecological research. *Trends in Ecology & Evolution* 22, 569-574.

Lotwick, H.W., Silverman, B.W., 1982. Methods for analysing spatial processes of several types of points. *Journal of the Royal Statistical Society* 44, 406-413.

Mac Nally, R., 2002. Multiple regression and inference in ecology and conservation biology: further comments on identifying important predictor variables. *Biodiversity & Conservation* 11, 1397-1401.

Malhi, Y., Gardner, T.A., Goldsmith, G.R., Silman, M.R., Zelazowski, P., 2014. Tropical Forests in the Anthropocene. *Annual Review of Environment and Resources* 39, 125-159.

Martens, S.N., Breshears, D.D., Meyer, C.W., 2000. Spatial distributions of understory light along the grassland/forest continuum: effects of cover, height, and spatial pattern of tree canopies. *Ecological Modelling* 126, 79-93.

Martínez-Ramos, M., Pingarroni, A., Rodríguez-Velázquez, J., Toledo-Chelala, L., Zermeño-Hernández, I., Bongers, F., 2016. Natural forest regeneration and ecological restoration in human-modified tropical landscapes. *Biotropica* 48, 745-757.

Maurent, E., Héroult, B., Pioniot, C., Derroire, G., Delgado, D., Finegan, B., Kientz, M.A., Amani, B.H.K., Bieng, M.A.N., 2023. A common framework to model recovery in disturbed tropical forests. *Ecological Modelling* 483, 110418.

Moeur, M., 1997. Spatial models of competition and gap dynamics in old-growth Tsuga heterophylla/Thuja plicata forests. *Forest Ecology and Management* 94, 175-186.

Morrison Vila, L., Ménager, M., Finegan, B., Delgado, D., Casanoves, F., Aguilar Salas, L.Á., Castillo, M., Hernández Sánchez, L.G., Méndez, Y., Sánchez Toruño, H., Solano, G., Zúñiga Mora, P., Ngo Bieng, M.A., 2021. Above-ground biomass storage potential in primary rain forests managed for timber production in Costa Rica. *Forest Ecology and Management* 497, 119462.

Myers, N., Mittermeier, R.A., Mittermeier, C.G., da Fonseca, G.A.B., Kent, J., 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403, 853-858.

Ndoungué Djeumekop, M.M., Ngo Bieng, M.-A., Ribeyre, F., Bonnot, F., Cilas, C., Neema, C., ten Hoopen, G.M., 2020. Spatial and Temporal Analysis of Phytophthora megakarya Epidemic in Newly Established Cacao Plantations. *Plant Disease* 105, 1448-1460.

Ngo Bieng, M.-A., Ginisty, C., Goreaud, F., Perot, T., 2006. First typology of oak and Scots pine mixed stands in Orléans Forest (France), based on the canopy spatial structure. *New Zealand journal of forestry science* 36, 325-346.

Ngo Bieng, M.A., 2007. Construction de modèles de structure spatiale permettant de simuler des peuplements virtuels réalistes. Application aux peuplements mélangés chêne sessile - pin sylvestre de la région Centre. In.

Ngo Bieng, M.A., Alem, L., Curtet, C., Tixier, P., 2017. Tree spacing impacts the individual incidence of Moniliophthora roreri disease in cacao agroforests. *Pest management science* 73, 2386-2392.

Ngo Bieng, M.A., Delgado-Rodríguez, D., Vilchez-Mendoza, S., López-Sampson, A., García, E., Sepúlveda, N., Somarriba, E., 2022a. Tree diversity in a tropical agricultural-forest mosaic landscape in Honduras. *Scientific Reports* 12, 18544.

- Ngo Bieng, M.A., Finegan, B., Sist, P., 2022b. Active restoration of secondary and degraded forests in the context of the UN Decade on Ecosystem Restoration. *Forest Ecology and Management* 503, 119770.
- Ngo Bieng, M.A., Gidoïn, C., Avelino, J., Cilas, C., Deheuvels, O., Wery, J., 2013a. Diversity and spatial clustering of shade trees affect cacao yield and pathogen pressure in Costa Rican agroforests. *Basic and Applied Ecology* 14, 329-336.
- Ngo Bieng, M.A., Ginisty, C., Goreaud, F., 2011. Point process models for mixed sessile forest stands. *Annals of Forest Science* 68, 267-274.
- Ngo Bieng, M.A., Perot, T., de Coligny, F., Goreaud, F., 2013b. Spatial pattern of trees influences species productivity in a mature oak–pine mixed forest. *European Journal of Forest Research* 132, 841-850.
- Ngo Bieng, M.A., Souza Oliveira, M., Roda, J.-M., Boissière, M., Hérault, B., Guizol, P., Villalobos, R., Sist, P., 2021. Relevance of secondary tropical forest for landscape restoration. *Forest Ecology and Management* 493, 119265.
- Oro, F.Z., Bonnot, F., Ngo-Bieng, M.A., Delaitre, E., Dufour, B.P., Ametefe, K.E., Mississo, E., Wegbe, K., Muller, E., Cilas, C., 2012. Spatiotemporal pattern analysis of Cacao swollen shoot virus in experimental plots in Togo. *Plant Pathology* 61, 1043-1051.
- Pendrill, F., Gardner, T.A., Meyfroidt, P., Persson, U.M., Adams, J., Azevedo, T., Bastos Lima, M.G., Baumann, M., Curtis, P.G., De Sy, V., Garrett, R., Godar, J., Goldman, E.D., Hansen, M.C., Heilmayr, R., Herold, M., Kuemmerle, T., Lathuilière, M.J., Ribeiro, V., Tyukavina, A., Weisse, M.J., West, C., 2022. Disentangling the numbers behind agriculture-driven tropical deforestation. *Science* 377, eabm9267.
- Picard, N., 2021. The role of spatial competitive interactions between trees in shaping forest patterns. *THEORETICAL POPULATION BIOLOGY* 142, 36-45.
- Poorter, L., Bongers, F., Aide, T.M., Almeyda Zambrano, A.M., Balvanera, P., Becknell, J.M., Boukili, V., Brancalion, P.H.S., Broadbent, E.N., Chazdon, R.L., Craven, D., de Almeida-Cortez, J.S., Cabral, G.A.L., de Jong, B.H.J., Denslow, J.S., Dent, D.H., DeWalt, S.J., Dupuy, J.M., Durán, S.M., Espírito-Santo, M.M., Fandino, M.C., César, R.G., Hall, J.S., Hernandez-Stefanoni, J.L., Jakovac, C.C., Junqueira, A.B., Kennard, D., Letcher, S.G., Licona, J.-C., Lohbeck, M., Marín-Spiotta, E., Martínez-Ramos, M., Massoca, P., Meave, J.A., Mesquita, R., Mora, F., Muñoz, R., Muscarella, R., Nunes, Y.R.F., Ochoa-Gaona, S., de Oliveira, A.A., Orihuela-Belmonte, E., Peña-Claros, M., Pérez-García, E.A., Piotta, D., Powers, J.S., Rodríguez-Velázquez, J., Romero-Pérez, I.E., Ruíz, J., Saldarriaga, J.G., Sanchez-Azofeifa, A., Schwartz, N.B., Steininger, M.K., Swenson, N.G., Toledo, M., Uriarte, M., van Breugel, M., van der Wal, H., Veloso, M.D.M., Vester, H.F.M., Vicentini, A., Vieira, I.C.G., Bentos, T.V., Williamson, G.B., Rozendaal, D.M.A., 2016. Biomass resilience of Neotropical secondary forests. *Nature* 530, 211-214.
- Ripley, B.D., 1977. Modelling Spatial Patterns. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)* 39, 172-192.
- Roberts, P., Boivin, N., Kaplan, J.O., 2018. Finding the anthropocene in tropical forests. *Anthropocene* 23, 5-16.
- Souza Oliveira, M., Finegan, B., Casanoves, F., Delgado, D., Sepulveda, N., Aguilar Porras, A., Chamorro, M.A., Morales Aymerich, J.P., Ngo Bieng, M.A., 2021. Biomass of timber species in Central American secondary forests: Towards climate change mitigation through sustainable timber harvesting. *Forest Ecology and Management* 496, 119439.

Suárez, J.C., Casanoves, F., Bieng, M.A.N., Melgarejo, L.M., Di Rienzo, J.A., Armas, C., 2021a. Prediction model for sap flow in cacao trees under different radiation intensities in the western Colombian Amazon. *Scientific Reports* 11, 10512.

Suárez, L.R., Suárez Salazar, J.C., Casanoves, F., Ngo Bieng, M.A., 2021b. Cacao agroforestry systems improve soil fertility: Comparison of soil properties between forest, cacao agroforestry systems, and pasture in the Colombian Amazon. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 314, 107349.

Suárez Salazar, J.C., Ngo Bieng, M.A., Melgarejo, L.M., Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., 2018. First typology of cacao (*Theobroma cacao* L.) systems in Colombian Amazonia, based on tree species richness, canopy structure and light availability. *PLOS ONE* 13, e0191003.

Vancutsem, C., Achard, F., Pekel, J.F., Vieilledent, G., Carboni, S., Simonetti, D., Gallego, J., Aragão, L.E.O.C., Nasi, R., 2021. Long-term (1990–2019) monitoring of forest cover changes in the humid tropics. *Science Advances* 7, eabe1603.

Veintimilla, D., Ngo Bieng, M.A., Delgado, D., Vilchez-Mendoza, S., Zamora, N., Finegan, B., 2019. Drivers of tropical rainforest composition and alpha diversity patterns over a 2,520 m altitudinal gradient. *Ecology and Evolution* 9, 5720-5730.