



Mémoire pour de diplôme de l'Habilitation à Diriger les Recherches  
École Doctorale GAIA Université de Montpellier

**Santé des plantes au sein des systèmes agroforestiers tropicaux, d'une approche systémique à la prise en compte des compromis entre services écosystémiques**

Présenté par  
Clémentine Allinne  
Chercheure à l'UPR GECO, CIRAD, Montpellier

*Mémoire déposé en avril 2024*

*Soutenu le 12 février 2025 devant le jury suivant :*

Bastien Castagneyrol (INRAE, UMR BIOGECO)

Safia Mediène (AgroParisTech, UMR AGRONOMIE)

Aude Vialatte (INRA, UMR DYNAMFOR)

Aurélië Metay (InstitutAgro, UMR ABSys)

Luc De Lapeyre De Bellaire (CIRAD, UPR GECO)

Marjin Tenhoopen (CIRAD)

Fabrice DeClerck (CGIAR, Alliance Bioversity-CIAT)



" Je déclare avoir respecté, dans la conception et la rédaction de ce mémoire d'HDR, les valeurs et principes d'intégrité scientifique destinés à garantir le caractère honnête et scientifiquement rigoureux de tout travail de recherche, visés à l'article L.211-2 du Code de la recherche et énoncés par la Charte nationale de déontologie des métiers de la recherche et la Charte d'intégrité scientifique de l'Université de Montpellier. Je m'engage à les promouvoir dans le cadre de mes activités futures d'encadrement de recherche."

*« Je veux des réponses, donc je fabrique des questions »*

*Gael Faye*

## TABLE DES MATIERES

Remerciements .....	7
PREAMBULE .....	8
LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES .....	9
1. PREMIERE PARTIE : ITINERAIRE PROFESSIONNEL.....	12
<b>1.1. CURRICULUM VITAE</b> .....	12
<b>1.2. L'INTEGRATION DES DIFFERENTS METIERS DE LA RECHERCHE</b> .....	14
<b>1.2.1. La technique au service de la rigueur scientifique : le DUT</b> .....	14
<b>1.2.2. La formation à la recherche par la recherche : le diplôme de l'EPHE</b> .....	14
<b>1.2.3. La recherche pour le développement : le VIE</b> .....	15
<b>1.2.4. La formalisation de la posture de chercheur : du Master2 Recherche à mon intégration au CIRAD</b> .....	15
<b>1.2.5. Le chercheur expatrié : collaboration et partenariat scientifique à l'international...</b> 15	
<b>1.3. INVESTISSEMENT DANS LA FORMATION ET LA DIRECTION DE RECHERCHE</b> .....	16
<b>1.3.1. Encadrement de Master</b> .....	16
<b>1.3.2. Encadrement de thèse de doctorat</b> .....	20
<b>1.3.3. Valorisation et production scientifique</b> .....	21
<b>1.3.4. Activités d'enseignement</b> .....	30
<b>1.4. INVESTISSEMENT DANS L'ANIMATION ET LA GESTION DE LA RECHERCHE</b> .....	30
<b>1.4.1. Animation de collectifs de recherche</b> .....	30
<b>1.4.2. Élaboration et animation de projets de recherche</b> .....	30
<b>1.4.3. Expertises</b> .....	34
2. DEUXIEME PARTIE : SYNTHESE DE MES TRAVAUX SCIENTIFIQUES.....	35
<b>2.1. ENJEUX , CADRES D'ANALYSE ET CONCEPTS MOBILISES</b> .....	35
<b>2.1.1. Gestion des maladies et ravageurs dans les systèmes de culture</b> .....	35
2.1.1.1. <i>Biodiversité, services écosystémiques et agroécosystème</i> .....	35
2.1.1.2. <i>Le service de régulation des maladies et ravageurs</i> .....	36
2.1.1.3. <i>Les méthodes de protections des cultures</i> .....	37
2.1.1.4. <i>Maladies, ravageurs et pertes de rendements</i> .....	39
2.1.1.5. <i>Une approche systémique pour quantifier les pertes de rendements</i> .....	40
<b>2.1.2. Une démarche de conception de systèmes de culture durables basée sur la fourniture de SE</b> .....	42
2.1.2.1. <i>Phase d'évaluation</i> .....	42
2.1.2.2. <i>Phase de conception</i> .....	42
<b>2.1.3. Modèle d'étude : les systèmes agroforestiers à base de caféiers</b> .....	44

2.1.3.1.	<i>Le café Arabica</i> .....	44
2.1.3.2.	<i>Les principales M&amp;R du caféier</i> .....	45
2.1.3.3.	<i>Les enjeux liés à la culture du café</i> .....	47
2.1.3.4.	<i>L'agroforesterie comme levier : Impact de la diversification sur le système de culture</i> .....	49
2.1.4.	<b>Ma démarche et mes questions de recherches</b> .....	51
2.2.	<b>EFFET DE LA DIVERSIFICATION ET DES PRATIQUES CULTURALES SUR LA DURABILITE DES SYSTEMES CONVENTIONNELS</b> .....	53
2.2.1.	<b>Comprendre les déterminants des profils de dégâts : Analyse de l'effet de la situation de production et des pratiques sur le complexe de M&amp;R et le rendement</b> .....	53
2.2.2.	<b>Prise en compte des effets antagonistes de l'ombrage au sein du complexe de M&amp;R</b> .....	55
2.2.3.	<b>Quantification et modélisation des pertes de rendement primaires et secondaires causées par M&amp;R du caféier : mise au point d'outils méthodologiques</b> .....	57
2.2.4.	<b>Effet de la diversification sur les pertes de rendement et les pertes économiques</b> ..	61
2.2.5.	<b>Effet de la diversification et de l'intensité de gestion sur la production de SE</b> .....	62
2.2.6.	<b>Transition des systèmes conventionnels vers des systèmes plus durables</b> .....	64
2.2.7.	<b>Conclusion : de l'évaluation des pertes de rendement à la conception de systèmes durables</b> .....	66
2.3.	<b>GESTION DE LA BIODIVERSITE POUR LA REGULATION DES M&amp;R DANS DES SYSTEMES BIOLOGIQUES</b> .....	68
2.3.1.	<b>Effet de la situation de production et des pratiques sur le complexe de M&amp;R et le rendement</b> .....	68
2.3.2.	<b>Rôle de l'organisation des arbres d'ombrages (composition et structure) sur la régulation des M&amp;R</b> .....	69
2.3.3.	<b>Des interactions complexes entre les composants du système : mise en évidence des effets directs et indirects des arbres d'ombrages sur les la régulation de M&amp;R</b> .....	72
2.3.4.	<b>Conclusion : vers l'optimisation de l'organisation de la biodiversité</b> .....	74
2.4.	<b>REFLEXIONS AUTOUR DE LA PARTIE BILAN :</b> .....	74
3.	<b>PARTIE III : PROJET DE RECHERCHE</b> .....	78
3.1.	<b>LES POINTS D'INFLEXION</b> .....	78
3.1.1.	<b>Intégration de nouveaux modèles biologiques pour la conception de SAF plurispécifiques à base de plantes pérennes</b> .....	78
3.1.2.	<b>Vers un nouveau paradigme de recherche : du pathogène vers le salutogène</b> .....	80
3.1.3.	<b>Prise en compte des disservices dans l'évaluation multicritère</b> .....	83
3.2.	<b>DEMARCHE DE RECHERCHE</b> .....	84
3.3.	<b>ÉTUDE DE LA RELATION DEGAT-DOMMAGE DANS UN GRADIENT DE COMPLEXITE DE SYSTEMES</b> .....	87
3.3.1.	<b>Développement d'outils méthodologiques pour quantifier les pertes de rendement</b> .....	87
3.3.2.	<b>Effet de la diversification sur les profils de M&amp;R et les pertes de rendement associées</b> .....	89

<b>3.4.</b>	<b>EFFETS DE L'ORGANISATION DE LA BIODIVERSITE (SPECIFIQUE CULTIVEE, VARIETALE, SPECIFIQUE ASSOCIEE) SUR LA REGULATION DES M&amp;R, LA SANTE DES PLANTES ET DE L'AGROECOSYSTEME.....</b>	<b>90</b>
<b>3.4.1.</b>	<b>Impact de la biodiversité sur la régulation des complexes de M&amp;R et la santé des cacaoyers.....</b>	<b>90</b>
<b>3.4.2.</b>	<b>Analyse des pratiques de pilotage de la santé des plantes dans les SAFs à base de cacaoyer en Côte d'Ivoire .....</b>	<b>91</b>
<b>3.5.</b>	<b>ÉVALUATION DES COMPROMIS ENTRE SERVICES ET DISSERVICES ECOSYSTEMIQUES POUR LA CONCEPTION DE SYSTEMES PLURISPECIFIQUES DURABLES.....</b>	<b>93</b>
<b>3.5.1.</b>	<b>Effet de la diversité végétale associée sur la fourniture de services écosystémiques au sein des systèmes agroforestiers à base bananiers et caféiers au Laos : modélisation et optimisation des compromis entre services pour la conception de systèmes de culture .....</b>	<b>93</b>
<b>3.5.2.</b>	<b>Quantification des SE et DES dans un gradient de gestion de pratiques (Biodiversité vs intrant anthropique) .....</b>	<b>94</b>
<b>3.6.</b>	<b>DEMARCHE DE FORMATION A ET PAR LA RECHERCHE.....</b>	<b>95</b>
<b>4.</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>97</b>
<b>5.</b>	<b>TIRES A PART .....</b>	<b>106</b>

## REMERCIEMENTS

---

En espérant n'oublier personne, je souhaite exprimer ma gratitude à toutes les personnes qui ont joué un rôle important dans la réalisation de ces travaux et qui ont permis à un moment ou un autre leur aboutissement,

Tout d'abord, je remercie l'ensemble des étudiants qui se sont investis à mes côtés, avec engagement et bonne humeur ces 13 dernières années. Je dis souvent, pour paraphraser Forest : « les étudiants c'est comme une boîte de chocolats, on ne sait jamais sur quoi on va tomber ! », et j'avoue ne jamais avoir été déçue par les qualités scientifiques et humaines des étudiants qui m'ont accompagné un bout de chemin dans la réalisation de mon travail. Certains ont littéralement fait partie de ma famille, et tous ont une place bien particulière dans mon cœur.

Je souhaite exprimer ma gratitude à toutes et tous les collègues, qui ont participé, que ce soit à travers des projets collaboratifs ou des échanges informels, à stimuler ma réflexion concernant mon projet de recherche, en particulier Leila Bagny-Beilhe pour nos incessants échanges et Philippe Tixier pour son positivisme et ses conseils toujours bienveillants.

Pour avoir partagé douze années au sein du même collectif, je tiens à remercier mes collègues de l'UMR SYSTEM, puis ABSys particulièrement Sandrine Renoir pour son appui sans faille, à tout moment et à toute heure.

Je tiens à remercier les rapporteurs de ce mémoire, pour leurs commentaires, avis et conseils très judicieux et toujours bienveillants, ainsi que tous les membres de mon jury, pour leur implication.

Pour m'avoir donné l'envie de faire de la recherche et parce qu'ils ont joué pour moi un rôle déterminant dans ma conception du travail de recherche et de l'interdisciplinarité je remercie, comme je l'ai déjà fait dans ma thèse, Thierry Robert et Anne Luxereau. J'espère pouvoir transmettre aux étudiants la

Évidemment, je tiens à exprimé un merci infini à ma famille, Thomas, Hélia et Noélie, qui m'ont accompagné à l'autre bout du monde, ont accepté mes absences, des déménagements et même surmonté une crise géopolitique, pour que mon travail ait un sens à mes yeux. Sans leur soutien, leurs encouragements, leur confiance, leur patience, et leur résilience, rien de ce que je présente dans ce mémoire n'aurait été possible. même envie que celle qu'ils m'ont transmise.

Enfin, je souhaite rendre hommage à mon père et ma mère, qui ont influencé ma vision du monde à travers leur prisme humaniste, scientifique et pédagogique, et qui font qu'aujourd'hui j'ai toujours cette envie de « tout comprendre » et de « tout transmettre ».

Si je souhaite aujourd'hui être habilitée à diriger les recherches, c'est avant tout pour légitimer mon engagement dans la formation à et par la recherche.

Pour moi, l'encadrement et le soutien des étudiants représentent une part importante de mes motivations en tant que chercheur. Parmi les multiples facettes inhérentes au travail de chercheur, la seule qui ne m'a jamais déçu est celle d'accompagnement d'étudiants et de jeunes chercheurs, et j'éprouve une grande satisfaction à voir un étudiant découvrir et s'épanouir dans le milieu de la recherche.

Enrichie par mes expériences d'encadrement passé, à présent, mon souhait est d'accompagner des doctorants dans l'acquisition de connaissances et de compétences sur les sujets de thèse que je propose, en adéquation avec le projet de recherche que je présente dans ce document.

De plus, je suis à un stade de ma carrière où je ressens le besoin de faire un bilan de mes expériences passées pour mieux me projeter dans l'avenir, notamment en assumant pleinement la responsabilité d'encadrer des étudiants en doctorat de manière autonome.

Depuis mon changement récent d'unité de recherche, je me suis engagée dans ce travail de rédaction, de synthèse, d'introspection et de projection qui a abouti à ce mémoire. J'ai maintenant envie de me consacrer pleinement et sereinement à la mise en œuvre de mon projet.

En vous souhaitant une bonne lecture.

**Tableaux**

Tableau 1 : Liste des étudiants de Master 2 encadrés depuis 2013. .... 17

Tableau 2 : Liste des étudiants de Master 1 et année de césures encadrés depuis 2012. .... 19

Tableau 3 : Liste des étudiants de doctorat encadrés depuis 2013. .... 20

Tableau 4 : Liste des étudiants de doctorat suivis dans le cadre de leur comité de thèse ..... 21

Tableau 5 : Liste des projets financés depuis 2011, financement (source et montant de la subvention du projet), porteur du projet, rôle au sein du projet, zone géographique d'intervention et chronologie des projets (montage en bleu et mise en œuvre en orange)..... 32

Tableau 6 : Liste des projets non financés depuis 2011, financement (source et montant de la subvention du projet), porteur du projet, rôle au sein du projet, zone géographique d'intervention et chronologie des projets (montage en bleu)..... 33

Tableau 7 : Positionnement des différents modèles biologiques étudiés (Musacée, Cacaoyer et Caféier) en fonction de leurs mécanismes et profils de dégâts. .... 79

**Figures**

Figure 1 : Impacts de la gestion agricole (aux échelles parcelles et paysage) sur le flux de services et de disservices écosystémiques. (Adapté de [12] et [13]). .... 36

Figure 2 : Principales voies d'actions pour réduire l'impact des M&R par l'introduction d'une diversité d'espèces végétales dans les agroécosystèmes.(traduit de Ratnadass et al, 2012 [17]) ..... 37

Figure 3 : Représentation des différents niveaux de rendement déterminés par les facteurs qui les définissent, les limitent ou les réduisent [20,24], et conceptualisation de la contribution des intrants anthropiques par rapport aux services écosystémiques dans un gradient d'agroécosystèmes (allant de celui qui n'exploite que la biodiversité pour promouvoir la production de services écosystémiques (A1) à celui basé principalement sur l'utilisation d'intrants d'origine anthropique (A3)). Pour cet exemple, les rendements accessibles et réels ainsi que les pertes ne varient pas dans ce gradient d'agroécosystèmes. Le rendement potentiel est défini par les "facteurs déterminants", le rendement accessible par les "facteurs limitants" (abiotiques) et le rendement réel par les "facteurs de réduction" (biotiques). Le rendement défini par les facteurs limitants est celui qui peut être atteint lorsque tous les facteurs de réduction sont compensés. .... 40

Figure 4 : représentation des relations entre profil de M&R, profil de dégât, mécanisme de dégât et dommage, et rappel des définitions..... 41

Figure 5 : Représentation des 2 principales étapes A) évaluation et B) conception) constituant la démarche de conception de systèmes de culture durable basée sur l'analyse des compromis entre services écosystémiques. Les numéros indiquent les différentes cases mentionnées dans le texte [31] [ACL5]. .... 43

Figure 6 : Gradient de complexité dans les systèmes agroforestiers à base de café (issus de [41] [ACL13]) ..... 44

Figure 7 : Représentation des principales régions productrices de café (Arabica et Robusta inclus), selon leur productivité (rendement moyen par hectare) et leur contribution à la production mondiale (exprimée en pourcentage de la production mondiale). La superficie récoltée et le nombre d'exploitations dans chaque région sont spécifiés par des diagrammes en barres. Les pays considérés sont le Brésil et le Vietnam comme les plus productifs ; l'Éthiopie, le Kenya, l'Ouganda, le Rwanda, le Burundi, la République-Unie de Tanzanie, le Cameroun et le Togo pour l'Afrique ; le Laos, l'Indonésie et la Chine pour le reste de l'Asie ; le Mexique, le Guatemala, El Salvador, le Honduras, le Nicaragua et le Costa Rica pour l'Amérique centrale ; et la Colombie, l'Équateur et le Pérou pour le reste de l'Amérique du Sud. Source des données : ITC -Enveritas et FAO. (Issus de [72] [ACL25]) ..... 49

Figure 8 : Effets de la diversification du café par l'agroforesterie sur la fourniture de services écosystémiques (mentionnés en italique).( Issus de Poncet *et al* 2014 [ACL25])..... 50

Figure 9 : Articulation entre les principaux objets d'études mobilisés dans ma démarche. .... 51

Figure 10 : Influence de la biodiversité, associée au système de culture et a son mode de gestion, sur les profils des M&R (IP1, IP2, IP3 et IP4) et la fourniture totale de services écosystémiques. Les M&R décrits sont : la rouille (Rou.), la cercosporiose (Cerc.), la maladie de la tache américaine (T.Am.), la mineuse des feuilles (Min.), le phoma (Ph.), les nématodes des lésions racinaires (Nem.P), les nématodes à galles (Nem.M), la

mort régressive des rameaux (Coll.), la maladie de la toile d'araignée (Cort.) et le chancre du café (Cera.). Les valeurs présentées ont été centrées réduites. (issus de [102] [L5]) .....	54
Figure 11 : Sévérité (A) exprimée en AUDPC par année pour l'ensemble du complexe de M&R et rendement (B) exprimé en poids sec des fruits, dans deux conditions d'ombrage : ombragées (Shade) et en plein soleil (Sun) ; et deux conditions de traitement chimiques : conventionnel et une protection maximum. Les effets de l'ombrage, du traitement chimique et leur interaction ont été testés par une ANOVA sur un modèle linéaire mixte.....	56
Figure 12 : Modèle d'équation structurelle explorant les relations entre l'ombrage, le traitement chimique, des indicateurs de croissance du caféier (surface foliaire et nombre de nœuds fructifère), l'incidence et la sévérité des M&R et le rendement. Les flèches représentent les relations unidirectionnelles entre les variables. Les flèches noires indiquent les relations positives et les flèches rouges les relations négatives. L'épaisseur des chemins significatifs a été mise à l'échelle en fonction de la valeur du coefficient de régression standardisé, indiqué dans la case correspondante. Les R <sup>2</sup> pour les composants des modèles sont indiqués dans les cases des variables de réponse. (C de Fisher =8,83 ; P-value= 0,842 ; AIC=62,83 ; K= 27) .....	56
Figure 13 : Représentation conceptuelle des dommages physiologiques causés par les M&R sur le rendement du caféier au fil des années, ainsi que des voies d'actions qui sous-tendent les pertes de rendement (a) primaires et (b) secondaires. Chez le caféier, les composantes du rendement sont le nombre de nœuds fructifères par arbre, le nombre de fruits par nœud et le poids des grains. En réduisant la surface foliaire - via la nécrose et la chute des feuilles et la mort des branches (Dieback) - les dégâts causés par les M&R foliaires et les ravageurs modifient les relations source-puit et réduisent le nombre de fruits par nœud et le poids des grains. Ces deux composantes sont également directement affectées par la chute des fleurs et des fruits ainsi que la nécrose des baies. Les dégâts physiologiques affectent le rendement de l'année, entraînant des pertes de rendement primaires. La réduction de la surface foliaire et les branches mortes affectent le processus de translocation et limite la croissance des branches, réduisant le nombre de nœuds fructifères l'année suivante et induisant ainsi des pertes de rendement secondaires (Figure issue de Avelino et al, 2018 [AC13])......	58
Figure 14 : Rendements et pertes de rendement primaires et secondaires résultant des séquences de traitements chimiques TTT, TTN, TNT, TNN. T : traité avec des pesticides ; N : pas de contrôle des M&R.(Figure X) Les différences significatives (P<0,05) entre les rendements du café sont indiquées par les lettres minuscules. Les flèches rouges et les nombres en pourcentage représentent les pertes de rendement. Yact : rendement accessible ; Yloss : perte de rendement du café ; I : pertes primaires résultant des dégâts de l'année en cours (année n) ; II : pertes secondaires résultant des dégâts de l'année n-1 ; III : pertes primaires et secondaires (pertes totales) résultant des dégâts des années n et n-1. (Figure issue de Cerda et al, 2017).....	59
Figure 15 : Modèle d'équations structurelles pour l'estimation du rendement réel du caféier pour deux modèles : List 1 (A) et List 2 (B). Yact : rendement réel du café par plante ; NFN : nombre de nœuds fructifères par plante ; DeadB : nombre de branches productives mortes par plante ; sAUDPC P&D : aire sous la courbe de progression du cortège de M&R, standardisé ; sAUPC Sev : aire sous la courbe de progression de la sévérité, standardisée ; (n) : année en cours (2015) ; (n-1) : année précédente (2014). Les flèches représentent les relations entre les variables ; noires : relations positives ; rouges : relations négatives ; en pointillés : voies d'action non significatives (P >0,05) ; en trait continu : voies d'action significatives (P <0,05). La valeur des coefficients de régression est indiqué à coté de chaque flèche correspondante. L'épaisseur des flèches a été ajustée par rapport à la valeur des coefficients de régression standardisés (non indiqués dans les figures). (Figure adaptée de Cerda et al, 2017 [ACL9])......	60
Figure 16 : Effet du type d'ombrage (plein soleil, ombrage simple et ombrage diversifié) et de l'intensité de gestions (gestion intensive ou faible niveau de gestion) sur la sévérité maximale du complexe de M&E (A), le rendement accessible (B), le rendement réel (C), les pertes de rendements (D), le revenu brut (E), les coûts de trésorerie (F), les flux de trésorerie (G) et les bénéfices (H). Différentes minuscules indiquent une différence significative entre les moyennes à p <0,05 sur la base d'analyses de variance utilisant des modèles linéaires mixtes généralisés et le test LSD (Fisher). (d'après[120][C16]).....	62
Figure 17 : Effet du type d'ombrage (plein soleil, ombrage simple et ombrage diversifié) sur l'acidité du sol (A), la teneur en potassium (B) et sur le carbone total de la biomasse aérienne (C). Différentes minuscules indiquent une différence significative entre les moyennes à p <0,05 sur la base d'analyses de variance	

utilisant des modèles linéaires mixtes généralisés et le test LSD (Fisher). (d'après Cerda et al., 2017 [119])	63
Figure 18 : Relations entre les services écosystémiques et la biodiversité dans un réseau de parcelles caféières représentant trois niveaux de diversification des systèmes (ou type d'ombrage) : plein soleil (CFS), faible diversification (CLD) et forte diversification (CHD); dans l'air des solutions possibles et désirables (carré gris), le pourcentage de différents types d'ombrage a été calculé. (Issus de [119] [ACL10])	64
Figure 19 : Relations entre les indicateurs de pertes (pertes de rendement et pertes économiques primaires et secondaires) et les indicateurs de rentabilité économiques (cash-flow), et de production de services écosystémiques (rendement en café (coffee yield) ; séquestration du carbone pour les arbres de services (C service trees) ; fertilité du sol (soil C)). L'air des solutions possibles et désirables des systèmes présentant les meilleures combinaisons recherchées est représenté par le carré gris. Les 6 systèmes atteignant les niveaux les plus souhaitables de SE sont indiqués en couleur. (Issus de [126][ACL16])	65
Figure 20 : A) Services écosystémiques et rentabilité économique pour trois niveaux de diversification des systèmes (ou type d'ombrage) : plein soleil (CFS), faible diversification (CLD) et forte diversification (CHD), B) identification des six systèmes les plus prometteurs (CAF1 à CAF6) et des possibles voies de transition pour passer des systèmes classiques (CFS, CLD, CHD) vers ces systèmes les plus prometteurs sont indiquées par des flèches noires. Les voies pour passer du système de culture peu durable au système de culture plus durable (en termes d'utilisation de pesticides) sont indiquées par des flèches colorées. (issus de Cerda et al ; 2020, [ACL16])	66
Figure 21 : Associations entre les profils de pratiques de gestion et les profils de M&R. Les barres représentent les écarts à la moyenne des valeurs centrées réduites de chaque variable. Les barres d'erreur représentent l'écart-type. (Issus de [127] [C5])	69
Figure 22. Tableau présentant les différentes valeurs des coefficients $\alpha$ , en fonction de la sévérité de la maladie de la tache américaine (Ojo de Gallo en espagnol :OG), et de la sévérité totale des maladies foliaires (A). Le graphique (B) représente les effets potentiels des arbres d'ombrage (avant pondération par la hauteur) sur la sévérité de l'OG, en fonction de leur distance aux caféiers.	70
Figure 23. Coefficient de régression des effets de chaque groupe d'arbres sur la sévérité de la maladie de la tache américaine (SevOG) (A) et de la sévérité de l'ensemble de maladies foliaires (SevTOT) (B), du modèle GLMM final.	71
Figure 24 : Résultats du modèle structurel représentant le réseau d'interactions entre les blocs représentant les composants du système étudié. Chaque flèche représente l'intensité et le sens des effets entre chaque variable latente. Les flèches bleues représentent un coefficient positif et les flèches rouges un coefficient négatif.	73
Figure 25 : Illustration du concept de mouvement le long d'un continuum du bien-être (H+) /maladie (H-). Comment une personne, où qu'elle se trouve sur le continuum, se rapproche-t-elle du pôle de la santé ? [165]	81
Figure 26 : Illustration des concepts de stabilité, de robustesse, de vulnérabilité et de résilience [169]	82
Figure 27 : Cadre conceptuelle reliant le fonctionnement de l'agroécosystème, les services et les disservices, la valeur et les pratiques agricoles. [14]	84
Figure 28 : Schéma conceptuel articulant mes différents axes de recherches et les questions associées Q1, Q2 et Q3. Les SE indiqués en gras sont ceux potentiellement impliqués dans l'élaboration du rendement accessible et la régulation des M&R.	86
Figure 29 : Indice de dégât par combinaison de M&R : pourriture des cabosses seule (BP), pourriture noire seul (M), mazorquero seul (MAZ) et la combinaison de la pourriture des cabosses et du mazorquero (BP+MAZ). Le résultat est exprimé en pourcentage de perte par rapport au nombre moyen de fèves par cabosse (46) pour chaque combinaison de M&R évaluée. SDRi représente la somme des DSRi et ASRi pour chaque combinaison M&R	87
Figure 30 : Représentation du VPDmax moyen a) par conditions d'ombrage associé (classe de % d'ombrage, FS= Full Sun), et b) par profils de dégâts (IP0= no disease ; IP1 = black pod rot ; IP2 = frosty pod rot; IP3 = American cocoa pod borer; IP4= black pod rot + American cocoa pod borer; IP5 = black pod rot + frosty pod rot; IP6 = frosty pod rot + American cocoa pod borer; IP7 = black pod rot + frosty pod rot + American cocoa pod borer [176].	89

## 1. PREMIERE PARTIE : ITINERAIRE PROFESSIONNEL

---

### 1.1. CURRICULUM VITAE

**Nom et Prénom:** Allinne Clémentine

**Nationalité :** Française

**Date de naissance :** 28/03/1980

**Adresse :** Cirad, Campus International de Baillarguet  
TA B-26/C - Bureau 206  
34980 Montferriez sur Lez- France  
Téléphone : +33 4 67 61 59 90  
Adresse électronique : clementine.allinne@cirad.fr

**Position actuelle:** Chercheure au CIRAD (Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement), département Persyst (Performances des systèmes de production et de transformation tropicaux) au sein de l'UR GECO (Fonctionnement écologique et gestion durable des agrosystèmes bananes et ananas)

#### Qualifications:

- 2009 **Doctorat Agrosystèmes, écosystèmes et environnement**, Université de Toulouse, INPT- Toulouse, France
- 2006 **Master Fonctionnement des écosystèmes et anthropisation** : Biosciences de l'environnement, Université de Toulouse, INPT-ENSAT- Toulouse, France
- 2004 **Diplôme de l'Ecole Pratique des Hautes Etudes**, Sorbonne-Paris, France
- 2000 **Diplôme Universitaire Technologique**, Institut Universitaire Technologique Génie Biologique, option analyse biologique et biochimique, Le Mans Université- Laval, France

#### Expériences professionnelles:

- depuis 2010 Chercheure CIRAD (Centre internationale de recherche en agronomie pour le développement)
- 01/07/2023 **UR GECO** (Fonctionnement écologique et gestion durable des agrosystèmes bananes et annanas)-Montpellier, France
- 01/07/2020 **UMR Agrosystème Biodiversifié (Absys), Montpellier**
- 01/08/2018 **CATIE** (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza), programme PRAGA (Programa de Agricultura y Agroforesteria)- Turrialba, **Costa Rica**
- 01/12/2017 **CATIE** (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza), programme PRAGA (Programa de Agricultura y Agroforesteria, Managua, **Nicaragua**
- 01/03/2011 **CATIE** (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza), programme PRAGA (Programa de Agricultura y Agroforesteria- Turrialba, **Costa Rica**
- 01/06/2010 **UMR SYSTEM** (Fonctionnement et conduite des systèmes de culture tropicaux et méditerranéens )-Montpellier, France
- 2009-2010 (9 mois) Université de Toulouse, UFR SVT, Toulouse, France- **Attachée temporaire d'enseignement et de recherche**

- 2006-2009 (3 ans) INRAE, UMR AGIR (Agrosystèmes et Développement territorial), équipe VASCO (Variétés, Systèmes de Culture et eau), Toulouse, France- **Allocataire de recherche**  
*-Modélisation écophysiological et analyse génétique pour la recherche de génotypes de tournesol (Helianthus annuus L.) adaptés aux basses températures causées par les semis précoces*
- 2006 (6 mois) Université de Toulouse, UFR SVT, Toulouse, France-Monitrice  
 INRAE, UMR AGIR (Agrosystèmes et Développement territorial), équipe Variétés, Systèmes de Culture et eau (VASCO), Toulouse, France. **Stage de Master 2**  
*-Etude de la vigueur à la levée et de la croissance de génotypes de tournesol en conditions froides.*
- 2005-2003 (15 mois) IRD, UMR DGPC (Diversité et Génome des Plantes Cultivées), équipe Dynadiv (Dynamique de la diversité), Niamey, Niger- **Volontaire Internationale**  
*-Etude de l'évolution de la diversité des mils et sorghos cultivés au Niger entre 1976 et 2003 : influence des facteurs naturels et anthropiques*  
*-Influence anthropique sur la répartition et sur les diversités du palmier doum (complexe Hyphaene) au Niger*
- 2003-2000 (3 ans) Université Paris-Saclay, UMR ESE (Laboratoire d' Ecologie, Systématique et Evolution)- équipe Biodiversité, Systématique et Evolution, Orsay, France- **Stage de l'EPHE**  
*-Etude de l'impact des pratiques agricoles et des flux de gènes sur la variabilité génétiques des formes cultivées et spontanées de mil (Pennisetum glaucum) dans deux localités du Niger.*
- 2000 (3 mois) Université de Nantes, UR ISOMer (Institut des substances et organisme de la mer), Nantes, France-Stage **d'IUT**  
*- Dosage de métaux lourds chez la moule hydrothermale Bathymodiolus thermophilus*

#### **Formations complémentaires:**

- 2011 Ecole thématique: Formation aux méthodes des sciences humaines appliquées à l'agroforesterie (10j)
- 2012 Ecole chercheurs en agroécologie: Utilisation des traits fonctionnels pour la conception de systèmes de culture multi-espèces durables en milieu tropical (4j)
- 2012 Statistiques spatiales avec R (4j)
- 2021 Développer un leadership inclusif (2j)
- 2017 Le management transversal (3j)
- 2021 Biofunctool® : indicateurs d'évaluation de la santé des sols (4j)
- 2021 Concepts de concertation et d'interdisciplinarité (3j)

## **1.2. L'INTEGRATION DES DIFFERENTS METIERS DE LA RECHERCHE**

Je vais ici retracer mon cursus universitaire, qui, comme on me l'a fait souvent remarqué, est « atypique » dans un milieu d'agronome où la plupart de mes collègues sont issus d'écoles préparatoires et de grandes écoles. Pourtant je réalise aujourd'hui la richesse d'un parcours moins classique, car il permet d'apporter une autre vision dans le milieu de la recherche académique où l'excellence et l'individualisme peuvent primer sur la créativité et le collectif. Ce parcours a fait de moi ce que je suis aujourd'hui et détermine mes relations au sein des collectifs avec lesquels j'interagis. Je considère le travail de recherche avant tout comme un travail d'équipe, où chacun, technicien, ingénieur, étudiant, chercheur, a un rôle déterminant à jouer, car il détient des compétences propres, misent au profit de l'intelligence collective. Depuis la conception d'un projet de recherche jusqu'à sa valorisation, c'est par l'implication de l'ensemble du collectif que l'on peut mener à bien un projet à la fois innovant et épanouissant humainement, et ce n'est pas au détriment de la qualité scientifique.

### **1.2.1. La technique au service de la rigueur scientifique : le DUT**

J'ai choisi après le bac d'intégrer un IUT de biologie, cursus qui valorise la formation technique et pratique, ce qui correspond bien à ma manière d'apprendre et de transmettre. J'ai découvert le milieu de la recherche lors de mon stage de fin d'études au sein du laboratoire ISOMER de l'université de Nantes. J'y ai travaillé sur l'origine de la vie dans les sources hydrothermales (techniquement sur le dosage de métaux lourds chez la moule hydrothermale *Bathymodiolus thermophilus*). Ce stage m'a permis de comprendre deux choses. D'abord, que je voulais continuer à faire de la recherche, et je désirais me confronter à des problèmes de nature plus scientifique que technique, et m'impliquer davantage dans la théorie et les questions de recherche.

Mais j'ai surtout appris que la validité de tout travail de recherche repose sur la cohérence du protocole d'acquisition des données et sur la qualité des mesures. Et personne n'est plus compétent pour cela qu'un technicien. La maîtrise de la technique et du terrain doit être mise à profit dès la conception d'un protocole, et pour cela il me semble indispensable d'impliquer l'équipe technique afin qu'elle s'approprie, à son échelle, les questions de recherche abordées. J'ai un très grand respect pour le métier de technicien, car il est difficile et nécessite une grande rigueur, une forte capacité d'adaptation, et beaucoup de patience.

### **1.2.2. La formation à la recherche par la recherche : le diplôme de l'EPHE**

En toute logique, j'ai cherché à poursuivre mes études par une formation pratique, et je me suis inscrite à la préparation du Diplôme de l'EPHE en « Sciences de la Vie et de la Terre » (SVT) qui est un diplôme d'établissement offrant une formation à la recherche par la recherche. J'ai intégré le laboratoire d'Écologie, Systématique, Évolution de l'université Paris XI, où j'ai travaillé pendant 3 ans sur un projet de recherche consacré à la gestion de la diversité génétique en milieu paysan et particulièrement à l'étude de l'influence des facteurs anthropiques et des flux de gènes sur la variabilité génétique des formes cultivées et spontanées du mil au Niger. Ce projet interdisciplinaire, où généticiens et anthropologues travaillaient main dans la main, a ancré en moi une vision claire de la puissance de l'interdisciplinarité: quand les questions de recherches les plus pertinentes et leurs réponses découlent d'échanges et de discussions à l'interface de champs disciplinaires distincts sur un objet commun.

En plus de ma formation théorique en écologie évolutive et génétique des populations (qui constitue encore aujourd'hui mon socle de connaissances), j'ai découvert le travail de terrain lors de mes séjours de terrain au Niger au sein de l'IRD, partenaire du projet, ce qui a clairement influencé la suite de mes choix.

### **1.2.3. La recherche pour le développement : le VIE**

Dès l'obtention de mon diplôme de l'EPHE, j'ai donc rejoint l'équipe de l'IRD basée à Niamey au Niger en tant que VIE, et ingénieur d'études responsable du laboratoire de biologie moléculaire. La proximité du terrain m'a alors sensibilisée à la nécessité d'acquérir des compétences en gestion des agroécosystèmes et en agronomie. En effet, certains concepts d'écologie comme la biologie de la conservation ou la conservation des ressources génétiques, vers lesquelles je voulais aller, m'ont semblé indissociables du contexte socio-économique et de la gestion des terres agricoles. Et dans des territoires où la sécurité alimentaire est un enjeu crucial, et où les études supérieures sont difficiles d'accès, l'appui à la recherche, fondamentale et appliquée, par la formation représente pour moi un levier majeur pour répondre aux enjeux écologiques de demain. Ainsi, l'envie d'élargir mes objets d'études à des échelles analytiques plus intégratives, couplée à la volonté de réfléchir à mes propres questions de recherche m'ont poussé à reprendre mes études à travers un Master recherche dans l'objectif de poursuivre en doctorat.

### **1.2.4. La formalisation de la posture de chercheur : du Master2 Recherche à mon intégration au CIRAD**

J'ai réalisé un M2 recherche « fonctionnement des écosystèmes et anthropisation » à l'ENSAT de Toulouse, puis j'ai continué en thèse à l'INRA au sein de l'UMR AGIR (Agroécologie, Innovation, Territoire). Afin d'apporter des connaissances sur la tolérance au froid du tournesol dans une logique de semis précoce et de conception de systèmes de cultures innovants, j'ai construit mon sujet de thèse à l'interface de 3 disciplines : l'écophysiologie, la génétique quantitative et la modélisation, au service de la recherche agronomique. J'ai également pu développer des compétences dans l'enseignement en tant que monitrice à l'Université Paul Sabatier Toulouse III, puis comme d'Attaché temporaire d'enseignement et de recherche à l'Université Paul Sabatier, dès la fin de mon contrat doctoral (septembre 2009). Mes années de doctorat ont conforté ma sensibilité claire pour l'interdisciplinarité, et mon goût pour l'enseignement et la transmission. Mais c'est vers le CIRAD que je me suis tournée prioritairement pour la suite de mon parcours, en raison de l'adéquation entre mes préoccupations et les enjeux qu'il traite. J'ai alors postulé et obtenu en 2010 à un poste intitulé « écologie des bioagresseurs appliquée à la conception de systèmes agroforestiers durables ». Bien qu'éloignée de mes précédents modèles biologiques, terrains, échelles d'étude et disciplines, j'ai abordé cette thématique et construit mon projet de recherche à travers une approche systémique et interdisciplinaire, en cohérence avec mes compétences acquises, et en adéquation avec mes convictions.

### **1.2.5. Le chercheur expatrié : collaboration et partenariat scientifique à l'international**

J'ai commencé ma carrière au CIRAD à l'UMR SYTEM (Systèmes de culture tropicaux et méditerranéens), directement en expatriation au Costa Rica, au CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza), où je suis restée en poste 6 ans (2011-2017). Durant cette période, je me suis surtout consacrée à l'acquisition de connaissances et la mise au point d'outils

méthodologiques. Sur la base des résultats obtenus précédemment, j'ai élargi ma thématique de recherche à des terrains d'études où les systèmes agroforestiers sont beaucoup plus diversifiés, et où les enjeux d'intensification écologique sont étroitement liés à ceux de sécurité alimentaire comme le Nicaragua et Haïti. Je suis alors partie en affectation au Nicaragua en janvier 2018, pour finalement être réaffectée au Costa-Rica en octobre 2018 en raison de la crise politique qui a secoué le Nicaragua à partir d'avril 2018. J'ai pu alors finaliser mes projets en Amérique centrale avant de rentrer d'expatriation en juillet 2020.

### **1.3. INVESTISSEMENT DANS LA FORMATION ET LA DIRECTION DE RECHERCHE**

#### **1.3.1. Encadrement de Master**

Depuis 2013 j'ai encadré 16 étudiants dans le cadre de leur stage de fin d'études de Master 2. Le détail concernant chacun d'eux est présenté dans le Tableau 1. La quasi-totalité de ces stages a été co-encadrée avec des collègues de disciplines différentes, en effet, les stages et la formation d'étudiants constituent pour moi un support important pour la construction de l'interdisciplinarité. Ainsi, je considère l'étudiant comme un membre de l'équipe au sein du groupe de travail qui se constitue autour du stage, et j'essaie autant que possible de l'impliquer le plus tôt possible dans la construction du sujet. Recevant souvent des demandes de stage spontanées, il arrive que ce soit le profil même de l'étudiant qui suscite l'émergence d'un sujet donné qui sans ses compétences et sa motivation à s'investir sur une thématique donnée ne serait pas aussi pertinent.

Je tiens également à présenter les 9 étudiants issus de M1 et de césure avec lesquels j'ai collaboré (Tableau 2), car bien que ce ne soient pas des stages de fin d'étude, leur contribution à mes travaux de recherches est largement significative. Ils ont souvent permis d'explorer des sujets et fronts de recherches trop risqués pour un stage de M2, ou à des périodes durant lesquelles les phénomènes biophysiques étudiés ne correspondaient pas au calendrier contraint des stages de M2. De plus, je pense que la recherche est en grande partie une vocation qu'il faut stimuler en faisant découvrir le milieu de la recherche. Il est donc important de s'investir dans la formation en amont de la dernière année du cursus universitaire, et de guider les étudiants dans leur choix en adéquation avec leur motivation et leur attente.

Tableau 1 : Liste des étudiants de Master 2 encadrés depuis 2013.

Année	Nom	Nationalité	Ecole	Spécialité	Sujet	Co-encadrants	Après le Master
2022 (6 mois)	Gastaldi Alexis	Française	AgroParisTech	AETPF	<b>Modéliser le coût de maintenance des services écosystémiques et de la santé de l'agro-écosystème des plantations de cacao en agroforesterie dans la région de San Martin au Pérou.</b>	L. Bagny (UMR PHIM)	CDI au CIRAD
2021 (6 mois)	Traby Ahmat	Tchadienne	Univ Clermont Auvergne	Economie du Développement Durable	<b>Enjeux d'intégration du concept One Health dans la recherche agronomique pour le développement au CIRAD.</b>	Collectif CTS SantéS	Auto-entrepreneur
2020 (6 mois)	Delmotte Sacha	Française	Univ Montpellier	B2E, EcoSystèmes	<b>Identification de traits fonctionnels foliaires d'arbres impliqués dans l'interception de particules transportées par le vent.</b>	N.Motisi et L. Bagny (UMR PHIM)	En thèse au CIRAD
2020 (12 mois)	Tejeda Antony	Dominicain	CATIE	Agroforestería y Agricultura Sostenible	<b>Caracterización de las condiciones ambientales (sombra, manejo) que favorecen la reducción de los daños causados por la Broca de café (Hypothenemus hampei) y por las enfermedades foliares del café.</b>	L. Bagny (UMR PHIM)	Agent à l'Instituto Dominicano del Café
2018 (6 mois)	Durant Lucie	Française	ISTOM		<b>Analyse de l'activité de fertilisation et de régulation de l'ombrage de caféiculteurs dans une démarche de co-conception de systèmes de culture durables.</b>	G.Azema (LIRDEF)	Chargée de projet en Agroforesterie à Madagascar
2018 (6 mois)	Durand-Bessart Clémentine	Française	Univ Montpellier	B2E, Bioget	<b>Quel type d'ombrage (combinaison d'espèces) pour une meilleure régulation des maladies foliaires dans les systèmes agroforestiers complexes caféiers au Nicaragua ?</b>	P.Tixier (UR GECO)	Thèse à l'UMR Biogéoscience, puis post-doc à l'IRD
2018 (12 mois)	Gutierrez Juan Martin	Colombien	CATIE	Práctica del Desarrollo	<b>Construcción participativa de criterios para la selección de alternativas de manejo de Café con sombra en La Dalia, Nicaragua.</b>		Consultant CATIE
2017 (6 mois)	Capelli Sara	Italienne	SupAgro/IRC	Agricultural Development in Smallholder Systems	<b>Survey, identification and characterization of coffee farms using cover crops in Costa-Rica.</b>	K.Vandermerse (UMR Eco&Sol)	
2017 (6 mois)	Andreotti Federico	Italien	Wageningen University	Internship Farming Systems Ecology	<b>Which Associated Trees Enhance Soil Fertility in Agroforestry? Linking Litter Cycle and Soil Analysis with Local Knowledge and Practices.</b>	E. Speelman (Wageningen)	Thèse au CIRAD, Chercheur à Wageningen
2017 (6 mois)	Pierre Genise	Haitienne	Agroparistech	EDTS-DEBATS	<b>Développement de systèmes agroforestiers mixtes à base de caféier et de cacaoyer : une stratégie possible en Haïti ?</b>	L. Bagny (UR 106)	Chargée de projet à la Fondation pour la Nature et l'Homme

Tableau 1 (suite): Liste des étudiants de Master 2 encadrés depuis 2013.

Année	Nom	Nationalité	Ecole	Spécialité	Sujet	Co-encadrants	Après le Master
2016 (12 mois)	Lohier Virgiles	Haitien	CATIE	Manejo y Conservación de Bosques Tropicales y Biodiversidad	<b>Potencialidad para la intensificación agroecológica en sistemas agroforestales con cacao y café en el departamento Norte de Haití.</b>	MS. Turmel (Biodiversity)	Responsable de projet en Haiti
2015 (6 mois)	Garrido Alexia	Française	ESA		<b>Effets de l'ombrage sur les bioagresseurs du caféier et la production et caractérisation des voies d'action : le microclimat, les ennemis naturels et la physiologie du caféier.</b>	J.Avelino (UR 106), B.Rapidel (UMR SYSTEM)	
2015 (6 mois)	Clément Eugénie	Française	INSA	GMM	<b>Statistics methods for the assessment of coffee yield losses caused by pests and diseases under different production situations.</b>	R.Cerda, J.Avelino (UR Bioagresseur)	Technical Account Manager chez Opendatasoft
2014 (12 mois)	Lagos Molina Sindy	Hondurienne	CATIE	Sistemas Agrícolas Sostenibles	<b>Efecto de la condición química del suelo y la fertilización sobre la incidencia, severidad y resistencia fisiológica de las plantas de café a la roya (<i>Hemileia vastatrix</i>).</b>	J.Avelino (UR 106)	Consultante
2014 (12 mois)	Pico Rosado Jimmy	Equatorien	CATIE	Agroforestería Tropical	<b>Efecto de la sombra del café y el manejo sobre la incidencia, severidad, cantidad de inóculo y dispersión de <i>Hemileia vastatrix</i> en Turrialba, Costa-Rica.</b>	J.Avelino (UR 106)	chercheur à l'INIAP
2013 (6 mois)	Ngo-Dinh Charlotte	Française	Supagro	PVD	<b>Mise en place et suivi d'un protocole pour évaluer l'effet de la structure et de la composition du peuplement végétal sur l'incidence du cortège de bioagresseur du café au Costa-Rica.</b>		Ingénieur agronome chez groupe Roullier

**Tableau 2 : Liste des étudiants de Master 1 et année de céures encadrés depuis 2012.**

Année	Nom	nationalité	Ecole	Année d'étude	Sujet	Co-encadrants	Après le Master
2022 (6 mois)	Luce Malo	Française	Supagro	Césure	Relation entre qualité des sols et régulation des maladies du cacaoyer à San Martin, Pérou.		M2 SAAD
2019 (4 mois)	Ninin Philippe	Française	Supagro	M1	Un estudio de las dinámicas de diversificación de los sistemas agroforestales de café orgánico en Costa Rica.		M2 Science politique
2019 (3 mois)	Griscelli Jeremy	Française	ENSAT	Césure	Investigación sobre la diversificación de cultivo de los productores de café del cantón de Turrialba.		Enseignant d'agronomie en Lycée Agricole
2017 (6 mois)	Mathiot Charlie	Française	AgroParisTech	Césure	Effet de l'altitude, de l'ombrage et des pratiques culturales sur les déterminants du rendement et les pertes de café à Turrialba.	R.Cerda, J.Avelino (UR 106)	Thèse, consultant PUR projet
2016 (6 mois)	Welsh Coralie	Française	Supagro	M1	Microclimate effects on pests and disease in coffee production. Defoliation effects on microclimate in coffee production and other crop production.		-
2014 (6 mois)	Krolczyk Louise	Française	AgroParisTech	Césure	Effet du niveau d'ombrage et des pratiques culturales sur le rendement accessible du café et ces déterminants.	R.Cerda, J.Avelino (UR 106)	-
2013 (6 mois)	Lechevallier Esther	Française	ENSAT	Césure	Estimation des pertes de rendement primaires et secondaires causées par les bioagresseurs du caféier : mise en place et suivie d'expérimentation.		Responsable de production Aliksir Inc, Quebec
2013 (3 mois)	Autret Bénédicte	Française	VetAgro	M1	Typologies de pratiques et profils de bioagresseurs dans les systèmes biologiques de production de café au Costa-Rica.		Thèse à l'INRA, Ingénieur d'Etude INRA, Directrice de l'UR ASTER
2012 (6 mois)	Vonthron Simon	Française	Supagro	Césure	Mise en place et suivie d'un protocole pour évaluer l'effet de la structure et de la composition du peuplement végétal sur l'incidence du cortège de bioagresseur du café au Costa-Rica.		Thèse à l'INRAE, Chargé de recherche INRAE

### 1.3.2. Encadrement de thèse de doctorat

Depuis mon entrée au CIRAD, j'ai construit (écriture du sujet, recherche de financement et de projets appuyés à la thèse et obtention du financement de la bourse de thèse, choix des candidats) et encadré 4 thèses de doctorat. Le détail de chacune d'elle est présenté Tableau 3. Bien qu'ancrées dans des disciplines propres, ces thèses ont toujours justifié l'existence d'une équipe d'encadrement interdisciplinaire, car elles répondent à des questions construites à l'interface disciplinaire.

Et comme il est essentiel qu'une thèse soit réalisée dans les meilleures conditions possibles, tant par la dynamique scientifique que par les moyens qui l'accompagnent, chaque thèse est adossée à un projet de recherche financé, garantissant les fonds pour son fonctionnement ainsi que les moyens humains nécessaires (étudiants, techniciens). Il est important pour moi qu'une équipe de travail se constitue autour de la thèse et du doctorant, qui doit également apprendre à gérer une équipe, sur le terrain et appuyer l'encadrement d'étudiants.

À ce jour, le seul étudiant à avoir terminé son doctorat est Rolando Cerda, qui est maintenant chercheur au CATIE et responsable du département d'agroforesterie. Je collabore encore beaucoup avec lui, à travers de nouveaux projets et la publication d'articles communs.

J'ai également participé à cinq comités de suivi de thèse (Tableau 4), ce qui a permis de construire un réseau de chercheurs travaillant sur des thématiques en cohérence avec mes travaux.

**Tableau 3 : Liste des étudiants de doctorat encadrés depuis 2013.**

Année	Nom	Nationalité	Co-encadrants	Direction	Inscription	Bourse	Projet associé	Sujet
2022-2025	<b>Morrisson Marie-Thérèse</b>	<i>Ivoirienne</i>	M. Notaro (UMR ABSys)	S. de Tourdonnet (UMR ABSys)	ED Gaia	CIRAD, Agropolis	Plant Health	Analyse des pratiques de pilotage de la santé des plantes pour la conception de systèmes agroforestiers à base de cacaoyer durables
2021-2024	<b>Millet Claude Patrick</b>	<i>Haitien</i>	V. Poncet (UMR DIADE)	P. Marracchini (UMR DIADE), E. Evens (Univ Quisqueya)	ED Gaia, Univ Quisqueya	Ambassade France Haiti, ARTS	PITAG	Caractérisation variétale et valorisation du patrimoine génétique des caféiers dans les systèmes agroforestiers haïtiens
2020-2024	<b>Ramos Marcos</b>	<i>Panameen</i>	L. Bagny (UMR PHIM)	B. Rapidel (UMR ABSys)	ED Gaia	Gouv. Panameen	Mazorquero	Impact de la biodiversité et de sa gestion sur la régulation du complexe de bioagresseur du cacaoyer
2014-2017	<b>Cerda Rolando</b>	<i>Bolivien</i>	J. Avelino (UR 106)	C. Gary (UMR SYSTEM)	ED Gaia	CIRAD	Colosses et CASCADE	Evaluation des pertes de récolte liées aux bioagresseurs dans une gamme de technicité de systèmes agroforestiers à base de café

**Tableau 4 : Liste des étudiants de doctorat suivis dans le cadre de leur comité de thèse**

Année	Nom	Nationalité	Direction et Encadrement	Sujet
2021-2024	Amazan Jean Fritzner	Haitien	L.Temple (UMR INNOVATION)	Conditions d'adoption d'innovations dans les filières cacaoyer et caféier en Haïti
2020-2023	Gentil Léa	Française	A.Metay et K.Barkaoui (UMR ABSys), E.Kazakou (UMR CEFE)	Gérer la diversité fonctionnelle des communautés végétales associées aux vignobles et aux oliveraies comme une source alimentaire pour les herbivores et les pollinisateurs: quelles potentialités dans un contexte d'aridification en Méditerranée?
2020-2024	Perez Mickael	Français	A.Metay (UMR ABSys), MH.Robin (UMR AGIR)	Modélisation des effets des pratiques culturales sur le développement épidémique d'agents pathogènes pour la conception de systèmes de culture viticoles moins dépendants des fongicides
2015-2018	García Nevárez Gerardo	Mexicain	E.Hidalgo Jaminson et H.Blanco Metzler (CATIE)	Evaluacion e calidad y métodos de produccion de controladores biologicis para el manejo de broca y roya en plantaciones de café organico bajo sombra en Turrialben Costa-Rica
2012-2015	Galbraith Sara	Américaine	J.C. Ordoñez (ICRAF), N.A. Bosque-Pérez (Univ. of Idaho)	Understanding the impact of land use on pollination services in the seasonally dry tropics

### 1.3.3. Valorisation et production scientifique

Depuis 2006, j'ai participé à la publication de 25 articles dans des revues à comités de lecture, dont 20 depuis mon entrée au CIRAD. Parmi ces 25 articles, je suis première autrice de 4 articles, deuxième autrice de 4, dernière autrice de 6, et 9 sont co-publiés avec des étudiants.

J'ai souligné les noms des étudiants que j'ai encadrés ou co-encadrés (thèse ou Master/ingénieur). Comme demandé par l'école doctorale GAIA, j'indique les facteurs d'impact (IF) des revues (2022, source <https://www.webofscience.com>). Tous ont un IF supérieurs à 1, avec une moyenne de facteur d'impact moyen sur 25 articles de 5.6, et d'après Scopus ont un h-index de 16 (<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=24175667000>). J'ai numéroté mes articles de ACL1 à ACL25 afin de leur faire référence facilement dans la suite du document.

J'ai également participé à la rédaction de 5 chapitres d'ouvrage, et à 30 communications dans des conférences nationales et internationales, dont .

#### **Articles publiés dans les revues à comité de lecture :**

	<b>IF (2022)</b>
ACL25 Millet C.P., Allinne C., Vi Tram , Marraccini P., Verleysen L., Couderc M., Ruttink T., Zhang D., Solano-Sánchez W., Tranchant C., Jeune W., Poncet V. 2024. Haitian coffee agroforestry systems harbor complex Arabica variety mixtures and under-recognized genetic diversity. <i>Plos one (accepted)</i>	3.7
ACL24 Poncet V., Van Asten P., Millet C.P., Vaas P., Allinne C. 2024. Which diversification trajectories make coffee farming more sustainable? <i>Current Opinion in Environmental Sustainability</i> , <b>68</b> , 10143. <a href="https://doi.org/10.1016/j.cosust.2024.101432">doi.org/10.1016/j.cosust.2024.101432</a>	7.2

- ACL23 Ramos M.J., Bagny Beilhe L., Alvarado J., Rapidel B., **Allinne C.** 2024. Disentangling Shade Effects for Cacao Pest and Disease Regulation in the Peruvian Amazonia. *Agronomy for Sustainable Development*, **44**: 11, 17p.  
[doi.org/10.1007/s13593-024-00948-6](https://doi.org/10.1007/s13593-024-00948-6) 7.3
- ACL22 Rafflegeau S., Gosme M., Barkaoui K., Garcia L., **Allinne C.**, Deheuvels O., Grimaldi J., Jagoret J., Lauri P.E., Merot A., Metay A., Reyes F., Saj S., Curry G.N., Justes E. 2023. The ESSU concept for designing, modeling and auditing ecosystem service provision in intercropping and agroforestry systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, **43**: 43, 24p.  
[doi.org/10.1007/s13593-023-00894-9](https://doi.org/10.1007/s13593-023-00894-9) 7.3
- ACL21 Dupont S., Irvine M.R., Motisi N., **Allinne C.**, Avelino J., Bagny-Beilhe L. 2022. Wind-flow dynamics and spore-like particle dispersal over agroforestry systems: impact of the tree density distribution. *Agricultural and Forest Meteorology*, **327**: 109214, 20p.  
[doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109214](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109214) 6.2
- ACL20 Archibald S., **Allinne C.**, Cerdán C. R., Isaac, M. E.. 2022 . From the ground up: patterns and perceptions of herbaceous community diversity in organic coffee agroecosystems. *Ecological Solutions and Evidence*, **3**, e12166.  
[doi.org/10.1002/2688-8319.12166](https://doi.org/10.1002/2688-8319.12166) 2.9
- ACL19 Sauvadet M., Trap J., Damour G., Plassard C., Van Den Meersche K., Achard R., **Allinne C.**, Autfray P., Bertrand I., Blanchart E., Deberdt P., Enock S., Essobo Nieboukaho J.D., Freschet G.T., Hedde M., de Melo Virginio Filho E., Rabary B., Rakotoarivelo M., Randriamanantsoa R., Rhino B., Ripoche A., Rosalie E., Saj S., Becquer T., Tixier P., Harmand J.M. 2021. Agroecosystem diversification with legumes or non-legumes improves differently soil fertility according to soil type. *Science of the Total Environment*, **785** : 148934, 11 p.  
[doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148934](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148934) 9.8
- ACL18 Durand-Bessart C., Tixier P., Quinteros A., Andreotti F., Rapidel B., Tauvel C., **Allinne C.** 2020. Analysis of interactions amongst shade trees, coffee foliar diseases and coffee yield in multistrata agroforestry systems. *Crop Protection*, **133** : 105137, 8 p.  
[doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105137](https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105137) 2.8
- ACL17 Bagny-Beilhe L., Roudine S., Alcides Quintero Perez J., **Allinne C.**, Daout D., Mauxion R., Carval D. 2020. Pest-regulating networks of the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) in agroforestry systems. *Crop Protection*, **131** : 105036, 10 p.  
[doi.org/10.1016/j.cropro.2019.105036](https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.105036) 2.8
- ACL16 Cerda R., Avelino J., Harvey C.A., Gary C., Tixier P., **Allinne C.** 2020. Coffee agroforestry systems capable of reducing disease-induced yield and economic losses while providing multiple ecosystem services. *Crop Protection*, **134** : 105149, 14 p.  
[doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105149](https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105149) 2.8
- ACL15 Andreotti F., Speelman E.N., Van Den Meersche K., **Allinne C.** 2020. Combining participatory games and backcasting to support collective scenario evaluation: an action research approach for sustainable agroforestry landscape management. *Sustainability Science*, **15** (5) p. 1383-1399.  
[doi.org/10.1007/s11625-020-00829-3](https://doi.org/10.1007/s11625-020-00829-3) 6
- ACL14 Sauvadet M., Van den Meersche K., **Allinne C.**, Gay F., de Melo Virginio Filho E., Chauvat M., Becquer T., Tixier P., Harmand J.M. 2019. Shade trees have higher impact on soil nutrient availability and food web in organic than conventional coffee agroforestry. *Science of the Total Environment*, **649** : p. 1065-1074.  
[doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.291](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.291) 9.8

- ACL13 Avelino J., **Allinne C.**, Cerda R., Willocquet L., Savary S. 2018. Multiple-disease system in coffee: From crop loss assessment to sustainable management. *Annual Review of Phytopathology*, **56** : p. 611-635. 10.2  
[doi.org/10.1146/annurev-phyto-080417-050117](https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080417-050117)
- ACL12 Charbonnier F., Rouspard O., Le Maire G., Guillemot J., Casanoves F., Lacoïnte A., Vaast P., **Allinne C.**, Audebert L., Cambou A., Clément-Vidal A., Defrenet E., Duursma R.A., Jarri L., Jourdan C., Khac E., Leandro P., Medlyn B.E., Saint André L., Thaler P., Van den Meersche K., Barquero Aguilar A., Lehner P., Dreyer E. 2017. Increased light-use efficiency sustains net primary productivity of shaded coffee plants in agroforestry system. *Plant, Cell and Environment*, **40** (8) : p. 1592-1608. 7.3  
[doi.org/10.1111/pce.12964](https://doi.org/10.1111/pce.12964)
- ACL11 Meylan L., Gary C., **Allinne C.**, Ortiz J., Jackson L., Rapidel B. 2017. Evaluating the effect of shade trees on provision of ecosystem services in intensively managed coffee plantations. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **245** : p. 32-42. 6.6  
[doi.org/10.1016/j.agee.2017.05.005](https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.05.005)
- ACL10 Cerda R., **Allinne C.**, Gary C., Tixier P., Harvey C.A., Krolczyk L., Mathiot C., Clement E., Aubertot J.N., Avelino J. 2017. Effects of shade, altitude and management on multiple ecosystem services in coffee agroecosystems. *European Journal of Agronomy*, **82** : p. 308-319. 5.2  
[doi.org/10.1016/j.eja.2016.09.019](https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.09.019)
- ACL9 Cerda R., Avelino J., Gary C., Tixier P., Lechevallier E., **Allinne C.** 2017. Primary and secondary yield losses caused by pests and diseases: Assessment and modeling in coffee. *PLoS One*, **12** (1) : 17 p. 3.7  
[doi.org/10.1371/journal.pone.0169133](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169133)
- ACL8 Savary S., Bregaglio S., Willocquet L., Gustafson D., Mason D'Croz D., Sparks A., Castilla N., Djurle A., **Allinne C.**, Sharma M., Rossi V., Amorim L., Bergamin A., Yuen J., Esker P., McRoberts N., Avelino J., Duveiller E., Koo J., Garrett K. 2017. Crop health and its global impacts on the components of food security. *Food Security*, **9** (2) : p. 311-327. 6.7  
[doi.org/10.1007/s12571-017-0659-1](https://doi.org/10.1007/s12571-017-0659-1)
- ACL7 **Allinne C.**, Savary S., Avelino J. 2016. Delicate balance between pest and disease injuries, yield performance, and other ecosystem services in the complex coffee-based systems of Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **222** : p. 1-12. 6.6  
[doi.org/10.1016/j.agee.2016.02.001](https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.02.001)
- ACL6 Boudrot A., Pico J., Merle I., Granados E., Vilchez S., Tixier P., Virginio Filho E.D.M., Casanoves F., Tapia A., **Allinne C.**, Rice R.A., Avelino J. 2016. Shade effects on the dispersal of airborne *Hemileia vastatrix* uredospores. *Phytopathology*, **106** : p. 572-580. 3.2  
[doi.org/10.1094/PHYTO-02-15-0058-R](https://doi.org/10.1094/PHYTO-02-15-0058-R)
- ACL5 Rapidel B., Ripoche A., **Allinne C.**, Metay A., Deheuvels O., Lamanda N., Blazy J.M., Valdés-Gómez H., Gary C. 2015. Analysis of ecosystem services trade-offs to design agroecosystems with perennial crops. *Agronomy for Sustainable Development*, **35** (4) : p. 1373-1390. 7.3  
[doi.org/10.1007/s13593-015-0317-y](https://doi.org/10.1007/s13593-015-0317-y)
- ACL4 **Allinne C.**, Maury P., Debaeke P., Sarrafi A., Grieu P. Physiological indicators for the genotype screening of low temperature-tolerant sunflowers associated with early sowing. 2010. OCL - Oleagineux Corps Gras Lipides 17(3), pp. 167-170 2.1  
[DOI: 10.1684/ocl.2010.0303](https://doi.org/10.1684/ocl.2010.0303)

- ACL3 **Allinne C.**, Maury P., Sarrafi A., Grieu P. 2009. Genetic control of physiological traits associated to low temperature growth in sunflower under early sowing conditions. *Plant Science*, **177** (4) : p. 349-359.  
[doi.org/10.1016/j.plantsci.2009.07.002](https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2009.07.002) 5.2
- ACL2 **Allinne C.**, Mariac C., Vigouroux Y., Bezançon G., Couturon E., Moussa D., Tidjani M., Pham J.L., Robert T. 2008. Role of seed flow on the pattern and dynamics of pearl millet (*Pennisetum glaucum* [L.] R. Br.) genetic diversity assessed by AFLP markers: A study in south-western Niger. *Genetica*, **133** (2) : p. 167-178.  
[doi.org/10.1007/s10709-007-9197-7](https://doi.org/10.1007/s10709-007-9197-7) 1.5
- ACL1 Mariac C., Robert T., **Allinne C.**, Remigereau M.S., Luxereau A., Tidjani M., Seyni O., Bezançon G., Pham J.L., Sarr A. 2006. Genetic diversity and gene flow among pearl millet crop/weed complex: A case study. *Theoretical and Applied Genetics*, **113** (6) : p. 1003-1014.  
[doi.org/10.1007/s00122-006-0360-9](https://doi.org/10.1007/s00122-006-0360-9) 5.7

### **Chapitres d'ouvrage**

- L5 **Allinne C.**, Boudrot A., De Melo E., Granados E., Merle I., Pico J., Vonthron S., Avelino J. 2019. Régulation des bioagresseurs du caféier par le couvert arboré au Costa Rica. In : Seghieri Josiane (ed.), Harmand Jean-Michel (ed.). *Agroforesterie et services écosystémiques en zone tropicale : Recherche de compromis entre services d'approvisionnement et autres services*. Versailles : Ed. Quae, p. 53-61.
- L4 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 : Seghieri Josiane (ed.), Harmand Jean-Michel (ed.). *Agroforesterie et services écosystémiques en zone tropicale : Recherche de compromis entre services d'approvisionnement et autres services écosystémiques*. Versailles : Ed. Quae, p. 229-242.
- L3 Rouspard O., **Allinne C.**, Van Den Meersche K., Vaast P., Rapidel B., Avelino J., Jourdan C., Le Maire G., Bonnefond J.M., Harmand J.M., Dautzat J., Albrecht A., Chevallier T., Barthès B., Clément-Vidal A., Gomez Delgado F., Charbonnier F., Benegas L., Welsh K., Kinoshita R., Vezy R., Pérez-Molina J.P., Kim J., Taugourdeau S., Defrenet E., Nespoulous J., Rançon F., Guidat F., Cambou A., Soma M., Mages C., Schnabel F., Prieto I., Picart D., Duthoit M., Rocheteau A., Do F.C., de Melo Virginio Filho E., Moussa R., Le Bissonnais Y., Valentin C., Sánchez-Murillo R., Roumet C., Stokes A., Vierling L.A., Eitel J.U.H., Dreyer E., Saint-André L., Malmer A., Loustau D., Isaac M.E., Martin A.R., Priemé A., Elberling B., Madsen M., Robelo A., Robelo D., Borgonovo C., Lehner P., Ramirez G., Jara M., Acuna Vargas R., Barquero A., Fonseca C., Gay F. 2019. Suivi des services écosystémiques dans un observatoire de caféiers agroforestiers. Applications pour la filière du café. In : Seghieri Josiane (ed.), Harmand Jean-Michel (ed.). *Agroforesterie et services écosystémiques en zone tropicale : Recherche de compromis entre services d'approvisionnement et autres services*. Versailles : Ed. Quae, p. 37-52.
- L2 Rapidel B., **Allinne C.**, Cerdan C., Meylan L., Virginio Filho E.D.M., Avelino J. 2015. Efectos ecológicos y productivos del asocio de árboles de sombra con café en sistemas agroforestales. In : Montagnini F. ; Somarriba E. ; Murgueitio E. ; Fassola H. ; Eibl B. (eds.). *Sistemas Agroforestales. Funciones Productivas, Socioeconómicas y Ambientales*. Turrialba : CATIE, p. 5-20.

- L1 Robert T., Khalfallah N., Martel E., Lamy F., Poncet V., **Allinne C.**, Remigereau M.S., Rekima S., Leveugle M., Lakis G., Silijak-Yakovlev S., Sarr A. 2011. *Pennisetum*. In : Chittaranjan Kole (ed.). *Wild crop relatives: genomic and breeding resources. Millets and grasses*. Heidelberg : Springer, p. 217-255.  
[doi.org/10.1007/978-3-642-14255-0\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-642-14255-0_13)

**Communications dans des conférences nationales et internationales (les numéros en gras correspondent aux communications orales)**

- C30 Temple L., Abadie C., **Allinne C.**, Bagny-Beilhe L., Binot A., Figuié M., Garine-Wichatitsky M. 2023. Approche intégrée de la santé en lien avec la santé publique dans une institution de recherche agronomique. Yaoundé : PNPLZER, 1 p. One Health Forum, 2023-11-02/2023-11-03, Yaoundé (Cameroun).
- C29** Cerda R., Ospina A., Casanoves F., Hagggar J., López de Paz E., González-Mollinedo S., **Allinne C.** 2022. How intensification-sustainability strategies influence the regulation of pests and diseases in coffee agroforestry systems. *En transition vers un monde viable*. Québec : Université de Laval; IUAF-ICRAF, 1 p. Congrès mondial d'agroforesterie. 5, 2022-07-17/2022-07-20, Québec (Canada).  
[https://conferium.com/Clients/226\\_web/index.lasso?lang=fr](https://conferium.com/Clients/226_web/index.lasso?lang=fr)  
<https://www.agroforestry2022.org/fr>
- C28** Ramos M.J., **Allinne C.**, Alvarado J., Rapidel B., Bagny-Beilhe L. 2022. How do shade and auto-shade play a role in pest and disease regulation in cocoa agroforestry systems? Poster O6. *En transition vers un monde viable*. Québec : Université de Laval; IUAF-ICRAF, 1 p. Congrès mondial d'agroforesterie. 5, 2022-07-17/2022-07-20, Québec (Canada).  
[https://conferium.com/Clients/226\\_web/index.lasso?lang=fr](https://conferium.com/Clients/226_web/index.lasso?lang=fr)  
<https://www.agroforestry2022.org/fr>
- C27 **Allinne C.**, Notaro M. 2022. Proposal of an innovative analysis framework of plant health management practices for the design of sustainable cocoa-based agroforestry systems. Poster E17. *En transition vers un monde viable*. Québec : Université de Laval; IUAF-ICRAF, 1 p. Congrès mondial d'agroforesterie. 5, 2022-07-17/2022-07-20, Québec (Canada).  
[https://conferium.com/Clients/226\\_web/index.lasso?lang=fr](https://conferium.com/Clients/226_web/index.lasso?lang=fr)  
<https://www.agroforestry2022.org/fr>
- C26** Ramos M.J., **Allinne C.**, Alvarado J., Rapidel B., Bagny-Beilhe L. 2022. A novel method for estimating PandDs related yield loss in cacao pods in the Peruvian Amazonia. R In : *Proceedings of the Second International Symposium on Cocoa Research. ICCO, CIRAD. Montpellier : ICCO-CIRAD, 9 p. ISBN 978-2-9563177-0-8 ; 978-2-87614-798-0 International Symposium on Cocoa Research (ISCR 2022). 2, Montpellier, France, 5 Décembre 2022/7 Décembre 2022.*  
<https://iscrsymposium.org/presentations-iscr-2022/>
- C25 Andreotti F., Speelman E.N., Van den Meersche K., **Allinne C.** 2019. Co-design agricultural systems combining gaming and backcasting methods in smallholder coffee agroforestry systems. In : Dupraz Christian (ed.), Gosme Marie (ed.), Lawson Gerry (ed.). *4th World Congress on Agroforestry. Book of abstracts*. Montpellier : CIRAD; INRA, p. 606 World Congress on Agroforestry. 4, 2019-05-20/2019-05-22, Montpellier (France).  
<https://agroforestry2019.cirad.fr/news-press>
- C24 Bommel P., Leclerc G., Motisi N., Avelino J., Merle I., **Allinne C.** 2019. MiRoya, un jeu de simulation pour lutter contre la rouille du café en Amérique Centrale. Marseille : s.n., 1 p. Colloque Jeux et enjeux. Jeux et simulations pour l'apprentissage individuel, collectif et organisationnel, 2019-05-13/2019-05-14, Marseille (France).  
<https://jeux-enjeux.blogspot.com/p/ateliers-session-4.html>

- C23 Sauvadet M., Van Den Meersche K., **Allinne C.**, Gay F., Virginio Filho E.D.M., Chauvat M., Becquer T., Tixier P., Harmand J.M. 2019. Shade tree species impacts on soil nutrient availability and food web in conventional and organic coffee agroforestry. In : Dupraz Christian (ed.), Gosme Marie (ed.), Lawson Gerry (ed.). *4th World Congress on Agroforestry. Book of abstracts*. Montpellier : CIRAD; INRA, p. 737 World Congress on Agroforestry. 4, 2019-05-20/2019-05-22, Montpellier (France).  
<https://agroforestry2019.cirad.fr/news-press>
- C22 Rafflegeau S., **Allinne C.**, Barkaoui K., Deheuvels O., Jagoret P., Garcia L., Gosme M., Lauri P.E., Mérot A., Metay A., Meziere D., Saj S., Smits N., Justes E. 2019. Ecosystem services functional motif: a new concept to analyse and design agroforestry systems. In : Dupraz Christian (ed.), Gosme Marie (ed.), Lawson Gerry (ed.). *4th World Congress on Agroforestry. Book of abstracts*. Montpellier : CIRAD; INRA, p. 733-733 World Congress on Agroforestry. 4, 2019-05-20/2019-05-22, Montpellier (France).  
<https://agroforestry2019.cirad.fr/news-press>
- C21 Durand-Bessart C., Tixier P., Quinteros A., Andreotti F., Rapidel B., Tauvel C., **Allinne C.** 2019. Analysis of the interactions of shade trees on coffee leaf diseases and coffee yield in complex agroforestry systems. In : Dupraz Christian (ed.), Gosme Marie (ed.), Lawson Gerry (ed.). *4th World Congress on Agroforestry. Book of abstracts*. Montpellier : CIRAD; INRA, p. 784 World Congress on Agroforestry. 4, 2019-05-20/2019-05-22, Montpellier (France).  
<https://agroforestry2019.cirad.fr/news-press>
- C20 Durand L., Azéma G., Justes E., Leblanc S., Lamanda N., **Allinne C.** 2019. Activity analysis of coffee growers in complex agroforestry systems, understanding the farmers' practices. In : Dupraz Christian (ed.), Gosme Marie (ed.), Lawson Gerry (ed.). *4th World Congress on Agroforestry. Book of abstracts*. Montpellier : CIRAD; INRA, p. 320 World Congress on Agroforestry. 4, 2019-05-20/2019-05-22, Montpellier (France).  
<https://agroforestry2019.cirad.fr/news-press>
- C19 Cerda R., **Allinne C.**, Gary C., Tixier P., Harvey C.A., Avelino J. 2019. Coffee agroforestry systems that reduce crop losses due to pests and diseases, while providing ecosystem services. In : Dupraz Christian (ed.), Gosme Marie (ed.), Lawson Gerry (ed.). *4th World Congress on Agroforestry. Book of abstracts*. Montpellier : CIRAD; INRA, p. 788 World Congress on Agroforestry. 4, 2019-05-20/2019-05-22, Montpellier (France).  
<https://agroforestry2019.cirad.fr/news-press>
- C18 Avelino J., **Allinne C.**, Bommel P., Cofré H., De Melo E., Casanoves F., Gamboa H., Gutiérrez I., Leclerc G., Merle I., Motisi N., Ribeyre F., Sibelet N., Tixier P., Treminio E. 2018. Toward a regional early warning system network for coffee leaf rust and associated socio-economic crises. San José : IICA, p. 14-15 AgMIP Global Workshop. 7, 2018-04-24/2018-04-26, San José (Costa Rica).
- C17 Sauvadet M., Van den Meersche K., **Allinne C.**, Virginio Filho E.D.M., Chauvat M., Becquer T., Tixier P., Harmand J.M. 2018. Shade tree species impacts on soil fauna and C, N, P cycles in Costa Rican organic and conventional coffee agroforestry systems. *Proceedings of the 20th Nitrogen Workshop "Coupling C-N-P-S cycles"*. Rennes : INRA, p. 427-428 Nitrogen Workshop "Coupling C-N-P-S cycles". 20, 2018-06-25/2018-06-27, Rennes (France).  
<https://workshop.inra.fr/nitrogenworkshop2018/N-Workshop-Proceedings-and-oral-presentations>

- C16 Roupsard O., Van Den Meersche K., **Allinne C.**, Vaast P., Rapidel B., Avelino J., Jourdan C., Le Maire G., Bonnefond J.M., Harmand J.M., Dauzat J., Albrecht A., Chevallier T., Barthès B., Clément-Vidal A., Gómez-Delgado F., Charbonnier F., Benegas L., Welsh K., Kinoshita R., Vezy R., Perez Molina J., Kim J.H., Taugourdeau S., Defrenet E., Nespoulous J., Rançon F., Guidat F., Cambou A., Soma M., Mages C., Schnabel F., Prieto I., Picart D., Duthoit M., Rocheteau A., Do F.C., de Melo Virginio Filho E., Moussa R., Le Bissonnais Y., Valentin C., Sánchez-Murillo R., Roumet C., Stokes A., Vierling L.A., Eitel J.U.H., Dreyer E., Saint-André L., Malmer A., Loustau D., Isaac M.E., Martin A., Priemé A., Elberling B., Madsen M., Robelo A., Robelo D., Borgonovo C., Lehner P., Ramirez G., Jara M., Acuna Vargas R., Barquero Aguilar A., Fonseca C., Gay F. 2017. Eight years studying ecosystem services in a coffee agroforestry observatory. Practical applications for the stakeholders. s.l., 11 p. World Coffee Summit, 2017-05-31/2017-06-03, San Salvador (El Salvador).
- C15 Avelino J., Oswald A., Cerda R., **Allinne C.**, Alpizar F., Bagny-Beilhe L., Breitler J.C., Cerdan C., De Melo E., Georget F., Mendez G., Muschler R.G., Rapidel B., Sepulveda C., Sibelet N., Somarriba Chavez E., Ten Hoopen G.M., Van den Meersche K., Vilchez S., Villain L., Ngo Bieng M.A. 2017. Plataforma científica sobre sistemas agroforestales a base de cultivos perennes en Mesoamérica (PCP). *Libro de resúmenes: Red tematica de sistemas agroforestales de Mexico Reunion Nacional*. La Paz : Red SAM, p. 63-64 Primera Reunión Nacional de la Red SAM. 1, 2017-10-30/2017-11-01, La Paz (Mexique).
- C14 Rapidel B., Meziere D., Metral R., Dupraz C., Mérot A., **Allinne C.**, Gary C. 2015. Evaluation and design of multispecies cropping systems with perennials: are current methods applicable?. In : Gritti Emmanuel S (ed.), Wery Jacques (ed.). *FSD5 Proceedings: Multi-functional farming systems in a changing world*. Montpellier : European Society of Agronomy, p. 447-448 International Symposium for Farming Systems Design. 5, 2015-09-07/2015-09-10, Montpellier (France).  
<http://www.fagro.edu.uy/fsd/agro2015/media.html>
- C13 Cerda R., **Allinne C.**, Krolczyk L., Mathiot C., Clement E., Harvey C.A., Aubertot J.N., Tixier P., Gary C., Avelino J. 2015. Ecosystem services provided by coffee agroecosystems across a range of topo-climatic conditions and management strategies. In : Gritti Emmanuel S. (ed), Wery Jacques (ed). *FSD5 Proceedings: Multi-functional farming systems in a changing world*. Montpellier : European Society of Agronomy, p. 447-448 International Symposium for Farming Systems Design. 5, 2015-09-07/2015-09-10, Montpellier (France).  
<http://www.fagro.edu.uy/fsd/agro2015/media.html>
- C12 Cerda R., Avelino J., Lechevallier E., Krolczyk L., Mathiot C., Clement E., Gary C., Tixier P., **Allinne C.** 2015. Modeling attainable yield and yield losses due to pests and diseases to compare performances of coffee farming systems. In : Gritti Emmanuel S (ed.), Wery Jacques (ed.). *FSD5 Proceedings: Multi-functional farming systems in a changing world*. Montpellier : European Society of Agronomy, p. 127-128 International Symposium for Farming Systems Design. 5, 2015-09-07/2015-09-10, Montpellier (France).  
<http://www.fagro.edu.uy/fsd/agro2015/media.html>
- C11 Roupsard O., Van den Meersche K., Rapidel B., De Melo E., Charbonnier F., **Allinne C.**, Avelino J., Roumet C., Stokes A., Bonnefond J.M., Vierling L.A., Boll J., Dreyer E., Saint André L., Loustau D., Elberling B., Isaac M.E., Malmer A., Sánchez-Murillo R., Fonseca C., Vargas V.J. 2015. COFFEE-FLUX (Costa Rica): observatory for monitoring and modeling carbon, nutrients, water and sediment ecosystem services in coffee agroforestry systems; mitigation and adaptation to climate changes through ecosystem manipulation. Toulouse : AnaEE, 1 poster Journée de l'Infrastructure nationale AnaEE France. 1, 2015-12-07/2015-12-07, Toulouse (France).

- C10 Roupsard O., Van den Meersche K., Rapidel B., De Melo E., Charbonnier F., **Allinne C.**, Avelino J., Roumet C., Stokes A., Bonnefond J.M., Vierling L.A., Boll J., Dreyer E., Saint André L., Loustau D., Elberling B., Isaac M.E., Malmer A., Sánchez-Murillo R. 2015. COFFEE-FLUX (Costa Rica) Observatory for monitoring and modeling carbon, nutrients, water and sediment ecosystem services in coffee agroforestry systems; Mitigation and adaptation to climate changes through ecosystem manipulation. Toulouse : s.n., 1 p. ANAEE 2015, 2015-12/2015-12, Toulouse (France).
- C9 Rapidel B., Ripoche A., **Allinne C.**, Deheuvels O., Lamanda N., Metay A., Valdez Gomez H., Gary C. 2014. Ecosystem services evaluation as a tool for the design of cropping systems. *7th Annual ESP Conference 2014: Local action for the common good: session ES in agricultural ecosystems to enhance ecosystem services : specificities in concepts, measurement methods and promotion tools & Managing biodiversity and ES in agricultural h.* s.l. : s.n., 1 p. Annual ESP Conference. 7, 2014-09-08/2014-09-12, San José (Costa Rica).
- C8 Bhattarai S., **Allinne C.**, Avelino J., Gary C., Rossing W.A.H., Tiftonell P., Rapidel B. 2014. Interaction between household and field characteristics in generation of ecosystem services from coffee agro-ecosystem of Llano Bonito, Costa Rica. In : *Ecosy. 7th Annual ESP Conference 2014: Local action for the common good: session Ecosystem Services and biodiversity in agricultural ecosystems: specificities in concepts, measurement methods and promotion tools, San Jose, Costa Rica, 8-12 September 2014.* s.l. : s.n., 2 p. Annual ESP Conference. 7, 2014-09-08/2014-09-12, San José (Costa Rica).
- C7 Charbonnier F., Roupsard O., Casanoves F., Audebert L., Defresnet E., Cambou A., **Allinne C.**, Rapidel B., Avelino J., Van den Meersche K., Harmand J.M., Jourdan C., Vaast P., Barquero A., Leandro P., Dreyer E. 2014. Strong spatial variability of light use efficiency in a coffee AFS highlighted by 3D light and gas exchange model. In : Wachira Mary Anne (ed.), Rabar Betty (ed.), Magaju Christine (ed.), Borah Gulshan (ed.). *Abstracts of the 3rd World Congress of Agroforestry 'Trees for life: accelerating the impact of agroforestry' : abstracts.* Nairobi : WCA [Nairobi], p. 72-72 World Congress on Agroforestry, 2014-02-10/2014-02-14, Delhi (Inde).
- C6 Rapidel B., Sibelet N., **Allinne C.**, Gutiérrez I., Meylan L., Villatoro M., Bhattarai S., Ortiz J., Bonilla A., Castro J., Araya J.J., Warren Raffa D., Laffourcade R., Dhorne S., Garcia A. 2013. The Llano Bonito Experiment, San Pablo de León Cortés, Tarrazú, Costa Rica. Investigating agricultural practices, environmental services and design of agroforestry systems in Costa Rica's Central mountains. In : CATIE. *VII Henry A. Wallace Inter-American Scientific Conference, 40° Aniversario Territorios Climáticamente Inteligentes en el Tropicó, 30 de setiembre 04 de octubre, 2013, Turrialba, Costa Rica.* s.l. : s.n., 1 p. Henry A. Wallace Inter-American Scientific Conference. 7, 2013-09-30/2013-10-04, Turrialba (Costa Rica).
- C5 Autret B., Avelino J., Ngo-Dinh C., Rapidel B., Tixier P., **Allinne C.** 2013. Las prácticas de los productores orgánicos como fuente de innovación para manejar las plagas y enfermedades de café. *40° Aniversario Territorios Climáticamente Inteligentes en el Trópico.* Montpellier : CIRAD, 1 p. Wallace Conference on Climate-smart territories in the tropics. 7, 2013-09-30/2013-10-04, Turrialba (Costa Rica).
- C4 **Allinne C.**, Barquero-Miranda M., Romero-Gurdián A., Savary S., Avelino J. 2013. Injury profiles in coffee are dependent on production situations: case studies in Costa Rica. *Proceedings of the 24th International Conference on Coffee Science, San José, Costa Rica, 12th-16th November 2012.* Paris : ASIC, p. 1170-1173 International Conference on Coffee Science. 24, 2012-11-12/2012-11-16, San José (Costa Rica).

- C3 Allinne C.**, Ghoribi N., Maury P., Maougal R., Sarrafi A., Ykhlef N., Grieu P. 2008. Early sowing as a means of drought escape in sunflower: effects on vegetative and reproductive stages. In : José M. Fernández-Martínez (ed.), Luís García-Torres (ed.), Pedro González (ed.), José M. Melero-Vara (ed.), Francisco Orgaz (ed.), Begoña Pérez-Vich (ed.), Francisco Villalobos (ed.). *Proceedings of the 17th International Sunflower Conference. Vol. 1.* Cordoba : Secretaría General Técnica, Servicio de Publicaciones y Divulgación, p. 423-428 International Sunflower Conference. 17, 2008-06-08/2008-06-12, Cordoba (Espagne).  
[http://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/133716107917x\\_International\\_Sunflower\\_Conferene\\_x\\_2\\_volumenesx.pdf](http://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/133716107917x_International_Sunflower_Conferene_x_2_volumenesx.pdf)
- C2 Allinne C.**, Maury P., Poormohammad K., Sarrafi A., Grieu P. 2006. Cold-tolerance in sunflower genotypes: genetic analysis of early vigour. Plant and Microbe Adaptations to cold, May 16 -20, 2006 – Salsomaggiore Terme ITALY
- C1 Robert T.**, Luxereau A., Mariac C., Ali K., **Allinne C.**, Bani J., Beidari Y., Bezançon G., Cayeux S., Couturon E., Dedieu V., Moussa D., Sadou M.S., Seydou M., Seyni O., Tidjani M., Sarr A. 2003. Gestion de la diversité en milieu paysan : influence de facteurs anthropiques et des flux de gènes sur la variabilité génétique des formes cultivées et spontanées du mil (*Pennisetum glaucum* ssp. *glaucum* et ssp. *monodii*) dans deux localités du Niger. In : Brenugat V. (ed.), Fridlansky F. (ed.), Marie F. (ed.), Mitteau M. (ed.). *Le patrimoine génétique : la diversité et la ressource.* Paris : BRG, p. 223-245 Colloque national, BRG/Union des ressources génétiques du Berry. 4, 2002-10-14/2002-10-16, La Châtre (France).

### **Autres Rapports**

- R7 Traby A.**, Temple L., Abadie C., **Allinne C.**, Binot A. 2022. Enjeux d'intégration du concept One Health dans la recherche agronomique pour le développement au CIRAD. Montpellier : CIRAD, 73 p.. numero\_rapport: Rapport technique n°2, CTS SantéS.
- R6 Bertrand B.**, **Allinne C.**, Avelino J., Biénabe E., David G., Durand N., Leroy T., Mieulet D., Rigal C., Vaast P. 2022. Feuille de route des recherches du Cirad à 10 ans sur la filière Café. Montpellier : CIRAD, 84 p.
- R5 Abadie C.**, **Allinne C.**, Binot A., Temple L. 2021. Approches intégrées de la santé des animaux, des plantes et des écosystèmes en lien avec la santé publique. Montpellier : CIRAD, 6 p.. (CTS SantéS).
- R4 Habigand M.**, Abadie C., Temple L., **Allinne C.**, Binot A. 2021. Typologie des connaissances publiées du Cirad sur " Une santé ". Montpellier : CIRAD, 11 p.
- R3 Allinne C.** 2018. ¿Los bioles, un insumo valioso para una caficultura sostenible y orgánica? Informe final del proyecto. San José : FITTACORI, 57 p.
- R2 Ferraris H.**, **Allinne C.** 2015. Prospection auprès des producteurs et beneficios de café biologique au Costa Rica. Etat des lieux des pratiques culturelles et établissement d'une base de données des acteurs du café biologique à échelle nationale. Montpellier : CIRAD, 42 p.
- R1 Sibelet N.** (ed.), Gutiérrez I. (ed.), Dulcire M. (ed.), Posada K. (ed.), **Allinne C.**, Ansay F., Chia E., Fonseca Morello T., Freguin-Gresh S., Glaria V., Gomez M.J., Gomez E., Mavisoy Muchavisoy K.H., Morales L., Penafior D.A., Shaver I., Zapata Y. 2012. Los Pagos por Servicios Ambientales (PSA) vistos como una tabla de salvación. Costa Rica. Los PSA y los servicios de la Asociación para el Desarrollo Sostenible de la Región Atlántica: percepción de los beneficiarios. Turrialba : CATIE, 42 p.

#### **1.3.4. Activités d'enseignement**

L'enseignement est une activité que j'apprécie beaucoup, c'est pour cela que j'ai cherché à être monitrice durant ma thèse, puis ATER après l'obtention de mon doctorat. Depuis mon entrée au CIRAD je participe ponctuellement à des enseignements dès que l'occasion se présente. J'ai ainsi participé lors de mon affectation au CATIE au module « Metodologías de Investigación Agroforestal », je participe aux modules de formation de Institut SupAgro "Fonctionnement des Écosystèmes Cultivés Plurispécifiques" et « amélioration des plantes », et au module de M2 « Phytobiome » de l'Université de Montpellier.

### **1.4. INVESTISSEMENT DANS L'ANIMATION ET LA GESTION DE LA RECHERCHE**

#### **1.4.1. Animation de collectifs de recherche**

##### **Au sein du collectif UMR**

De 2014 à 2018, j'ai assuré la coordination de l'animation d'un des axes thématiques au sein de l'UMR SYSTEM : l'axe thématique « Biodiversité Associée et Services Ecosystémiques » (BASE). Il s'agissait de structurer les recherches menées au sein de l'UMR sur différents systèmes et terrains d'études autour de la question des services écosystémiques associés à la biodiversité associée dans les systèmes, avec un focus particulier sur la régulation des M&R. L'objectif était de coordonner et d'animer les réflexions au sein du collectif, dans lesquelles nous confrontions les connaissances propres aux différents systèmes étudiés (vigne, agroforesterie tempérée, cacao, café) et terrains (Cameroun, Costa-Rica, France) afin d'identifier des concepts et des méthodes mobilisables pour la conception de systèmes de cultures innovants, et performants au niveau agronomique, économique et environnemental.

##### **Au sein du collectif CIRAD**

Depuis janvier 2021 je suis co-animatrice avec 3 autres animateurs du champ thématique stratégique « Une approche intégrée de la santé des animaux, des plantes et des écosystèmes, en lien avec la santé publique » ou CTS SantéS. Les CTS du CIRAD (il y en a six) ont pour fonctions d'assurer une animation à l'échelle de l'établissement, transversalement aux 3 départements scientifiques. Mon implication vise à i) construire une animation scientifique, donnant un cadre thématique collectif de réflexion pour la construction du positionnement scientifique original, intégratif et institutionnel du CIRAD, ii) contribuer à la structuration du partenariat, *via* des alliances, réseaux, dispositifs appropriés, iii) mettre en œuvre une démarche prospective du champ thématique pour faciliter l'émergence d'idées et de projets co-construits (émergeants suite à des actions incitatives ou prescriptives, iv) construire des messages scientifiques clarifiant les actions et rendant lisibles les compétences du CIRAD et de ses partenaires dans ce champ thématique.

#### **1.4.2. Élaboration et animation de projets de recherche**

La conception et l'exécution de projets constituent le principal levier pour concrétiser la vision que nous aspirons à insuffler dans la recherche: où, avec qui, comment, pour répondre à quels enjeux ? Les collaborations construites et les méthodes mobilisée lors de montage de projets déterminent la façon dont nous faisons de la recherche, et les moyens que nous nous donnons pour répondre à nos questions de recherche. Et je suis persuadée de la nécessité de construire des consortiums interdisciplinaires et des moyens d'animation de ces collectifs adaptés.

Depuis mon entrée au CIRAD, je me suis donc fortement impliquée dans la recherche de financement à travers le montage de projets de recherche et d'expertises, que ce soit auprès de gros bailleurs

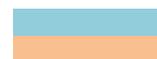
impliquant des consortiums internationaux, comme pour répondre aux demandes de coopératives de producteur

Sur les 30 projets dont j'ai participé au montage, 18 ont abouti (Tableau 5), et 12 n'ont pas été financés (Tableau 6). J'ai assuré la coordination de 4 projets, la coordination régionale du projet STRADIV en Amérique Centrale, et la coordination de WP dans deux projets.

Ces projets m'amènent à collaborer régulièrement avec des unités de recherches au sein du CIRAD (PHIM, ABSys, BGPI, GREEN, DIADE, AGAP, AMAP), au niveau national (UMR ISPA, UMR AGIR, le LIRDEF) et international (CATIE Managua, Université Greenwich, Université Valle de Guatemala, CRC Université de West Indies, Université Chrétienne du Nord d'Haïti), mais également avec des acteurs du développement (AVSF, AYITIKA) ainsi qu'avec des coopératives et des groupements de producteurs (UCA la Dalia, Apoya).

**Tableau 5 : Liste des projets financés depuis 2011, financement (source et montant de la subvention du projet), porteur du projet, rôle au sein du projet, zone géographique d'intervention et chronologie des projets (montage en bleu et mise en œuvre en orange).**

Nom du projet	Financement	Porteur du projet	Implication	Zone d'intervention	Chronologie																	
					2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026		
1 <b>CONNECTA</b> : Modélisation des impacts du changement climatique et des marchés sur la CONNEctivité fonctionnelle du corridor biologique volcánica central TALamanca, au Costa Rica, et les services écosystémiques associés	FRB (10k€)	UR 106	Exécution	Costa-Rica																		
2 <b>SAFSE</b> : Recherche de compromis entre productions et services écosystémiques fournis par les systèmes agroforestiers	CIRAD / IRD / AIRD (600k€)	UMR Eco&Sols	Exécution	Costa-Rica																		
3 <b>CoLosses</b> : Developing a methodology for the assessment of primary and secondary yield losses due to pests and diseases on perennial crops: the case of	Metaprogramme SMaCH-INRA (60k€)	UMR SYSTEM	Coordination projet	Costa-Rica																		
4 <b>CASCADE</b> : Ecosystem-based Adaptation for Smallholder Subsistence and Coffee Farming Communities in Central America	International Climate Initiative -IKI (3M€)	Conservation International	Exécution	Costa-Rica																		
5 <b>STRADIV</b> : System approach for the TRAnstition to bio-DIVersified agroecosystems, from process analysis to multi-scale co-conception with actors	Agropolis Fondation (1.2M€)	UMR AIDA/UMR GECO	Coordination Régionale	Costa-Rica; Nicaragua																		
6 ¿Los bioles, un insumo valioso para una caficultora sostenible y orgánica?	FITTACORI- (4k€)	Asociación	Coordination	Costa-Rica																		
7 Cours Café	OLAM (38k€)	UMR SYSTEM	Exécution	Costa-Rica																		
8 <b>PROCAGICA</b> : Programa Centroamericano de Gestión Integral de la Roya del Café	UE (15M€)	IICA	Exécution	Costa-Rica; Nicaragua																		
9 <b>MACSI</b> : Mobilisons l'Analyse des Compromis entre Services écosystémiques pour l'Ingénierie agroécologique des systèmes agricoles et forestiers	Metaprogramme EcoServ/AI Cresi-INRA/CIRAD (29k€)	UMR SYSTEM	Exécution	Costa-Rica																		
10 Expertise	BID/AVSF (12k€)	AVSF	Consultant	Haiti																		
11 <b>Agriforlac</b> : Agriculture, agroforesterie et foresterie pour l'Amérique Latine et les Caraïbes	AI PROPIS-CIRAD (10k€)	UR FES/UMR SYSTEM /UR 106	Coordination projet	Amérique Centrale																		
12 Expertise	PITAG- BID (150k€)	UMR SYSTEM	Consultant	Haïti																		
13 <b>PITAG</b> Proposition Technique Consortium, Sous-programme Agroforesterie à dominante café et cacao	PITAG-BID (3,4M€)	AVSF	Coordination projet	Haïti																		
14 <b>ModAfé</b> : Modélisation de la micrométéorologie et de la Dispersion de spores dans un système Agroforestier à base de caféiers	EC2CO - CNRS/INSU (15k€)	UMR ISPA	Exécution	Costa-Rica																		
15 <b>Mazorquero Cacao</b> : Lutte intégrée contre le "Mazorquero" du cacao au Pérou	Chanel (376k€)	UR 106	Exécution	Pérou																		
16 <b>SEACAF</b> : Sustainability-Intensification Trade-offs in Coffee Agroforestry in Central America	BBSRC (1.6M€)	Greenwich University	Exécution	Guatemala; Costa-Rica																		
17 <b>Plant Health</b> : Health of plants in their socio-ecological ecosystem	Agropolis Fondation (200k€)	UMR PHIM-CIRAD/IRD/INRA	Coordination WP	Cote d'Ivoire																		
18 <b>Field Lab Cacao</b> : Cacao Field Lab in the Peruvian amazon: cultivating resilience, driving autonomy, replicating solutions	Fondations (3.1M€)	Fondation Choba-choba	Coordination WP	Pérou																		


 montage  
 mise en oeuvre

**Tableau 6 : Liste des projets non financés depuis 2011, financement (source et montant de la subvention du projet), porteur du projet, rôle au sein du projet, zone géographique d'intervention et chronologie des projets (montage en bleu).**

Nom du projet	Financement	Porteur du projet	Implication	Zone d'intervention	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1 <b>ES-PRESSo</b> : Effets des PRESSions des changements globaux sur la provision de Services Ecosystémiques dans les systèmes agroforestiers à base de café	ANR (201k€)	UR 106	Exécution	Costa-Rica		■												
2 <b>PRESSanthropo</b> : Adaptabilité des systèmes agroforestiers à base de café aux pressions climatiques et anthropiques	ANR (934k€)	UMR INNOVATION	Exécution	Costa-Rica			■											
3 <b>RezoCaribEco</b> : Réseau Caraïbéen pour l'intégration de techniques agro-écologiques	FEDER, INTERREG (3M€)	UR HortSys	Exécution	Haïti						■								
4 <b>PARADIGM</b> : Promoting uptake of integrated crop management in coffee and cacao to secure sustainable production	H2020 (3.5M€)	UR 106	Exécution	Amérique centrale						■								
5 What is the potentiality of biopesticides use to reduce coffee rust impact?	WCR (30k€)	UMR SYTEM	Coordination projet	Costa-Rica							■							
6 <b>AVENIR CACAO</b> : Eliminating constraints to increasing (quality) cocoa production in Grand Anse, Haïti	Gouvernement Canadien (150k€)	CARE	Exécution	Haïti								■						
7 Services d'assistance technique long terme au programme SAN Ileme FED, Port-de-Paix, Haïti"	EuropeAid (3.6M€)	EPTISA	Consultant	Haiti									■					
8 <b>Agriforlac</b> : Agriculture, agroforesterie et foresterie pour l'Amérique Latine et les Caraïbes	CIRAD-PROPIS-PhaseII (35k€)	UR FES; UMR SYSTEM; UR 106	Coordination projet	Amérique Centrale														
9 Expertise	PITAG/BID (150k€)	UMR SYSTEM	Consultant	Haïti														
10 Impact of soil microbial communities, and other biotic and abiotic factors on coffee agro-systems in Colombia and Costa-Rica	BBSRC (340k€)	Exeter University	Exécution	Costa-Rica; Colombie														
11 <b>API-DOM</b> : Agroforesterie pour la Protection des cultures Inclusive dans les Départements français d'Outre-Mer	ANR (300k€)	UPR Geco	Coordination projet	Dom														
12 <b>Typic Haïti</b> : Characterize the potential of Haitian coffee (Typical variety for gourmet speciality coffee) in the context of agroforestry system	Agropolis Fondation (105k€)	UMR DIADE	Coordination WP	Haïti														

### **1.4.3. Expertises**

#### **Évaluation d'articles :**

Sur sollicitation des éditeurs, je fais régulièrement le travail de reviewing pour des journaux internationaux. J'ai ainsi évalué plus d'une dizaine d'articles pour différentes revues : *Agronomy for Sustainable Development*, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *Agroforestry System*, *Fruits*, *Biotechnologie Agronomie Société Environnement*.

#### **Jury de recrutement:**

Sur sollicitation des directions de département du CIRAD, J'ai participé à trois jurys de recrutement pour le CIRAD :

- Ingénieur.e pour la gestion agroécologique de la cercosporiose du bananier. (Département PERSYST)
- Entomologiste spécialiste de la production agroécologique des systèmes de cultures maraîchers. (Département PERSYST)
- Chercheur, sélectionneur.se/généticien.ne cacaoyer Guyane (Département BIOS)

Depuis mon entrée au CIRAD en 2011, j'ai construit, un projet de recherche dont l'objectif est de produire des connaissances, des méthodes et des outils pour **concevoir et évaluer des systèmes agroforestiers (SAFs) caféiers sous contraintes biotiques (maladies et ravageurs) tout en limitant l'utilisation de pesticides**. Les connaissances produites sur la compréhension du fonctionnement des SAFs et du service de régulation des M&R étaient mobilisées dans une démarche de conception de systèmes de culture plurispécifiques à base de caféiers durables et résilients face aux changements globaux, basée sur l'optimisation des compromis entre services écosystémiques (SE) et développés en partenariat avec les producteurs.

J'ai développé une approche intégrée ce qui m'a amené à mobiliser et adapter un certain nombre de cadres théoriques et de concepts, que je vais présenter dans un premier temps, car il constitue le socle de connaissance sur lequel repose ma démarche de recherche. Puis, je présenterai les principaux résultats issus de ces travaux.

### 2.1. ENJEUX , CADRES D'ANALYSE ET CONCEPTS MOBILISES

#### 2.1.1. Gestion des maladies et ravageurs dans les systèmes de culture

##### 2.1.1.1. Biodiversité, services écosystémiques et agroécosystème

La biodiversité détermine le fonctionnement et les propriétés des écosystèmes (Loreau et al., 2021; Tilman et al., 1996), en particulier leur capacité à générer des biens et des services écosystémiques (Hooper et al., 2005). Les services écosystémiques (SE), définis alors comme les bénéfiques produits par les fonctions et les structures des écosystèmes pour le bien-être de l'homme, se répartissent selon le Millennium Ecosystem Assessment (Assessment, 2005), en quatre grandes catégories: les services d'approvisionnement, les services de support, les services de régulation et les services culturels (Figure 1).

Dans des écosystèmes cultivés, ou agroécosystèmes, les fonctions écosystémiques sont exploitées et/ou valorisées par l'homme pour produire des biens agricoles et des services. La diversification des agroécosystèmes a été préconisée pour améliorer la résilience et la durabilité de l'agriculture (Malézieux et al., 2009). Selon Altieri (Altieri, 1999), la biodiversité, planifiée et associée, permet de maintenir les services écologiques clés qui, s'ils sont correctement assemblés dans le temps et l'espace, peuvent améliorer la capacité des agroécosystèmes à maintenir la fertilité des sols, la protection des cultures et la productivité.

Toutefois, cela ne signifie pas que les agroécosystèmes diversifiés sont nécessairement plus productifs (Malézieux, 2012), ce qui suggère l'existence de compromis entre la production et d'autres SE. Par exemple, la productivité du cacao, du café ou de la banane dans des SAFs peut être très faible en raison de contraintes abiotiques (compétition pour la lumière, les ressources en eau et en nutriments) et de pressions biotiques (en particulier les maladies et ravageurs (M&R)) (Deheuvels et al., 2012; Perfecto et al., 2005; Poeydebat et al., 2016).

En effet, en fonction des pratiques de gestion, l'agroécosystème peut aussi générer des disservices écosystémiques (DES), définis comme les fonctions et les structures de l'écosystème qui peuvent être préjudiciables au bien-être de l'homme (von Döhren and Haase, 2015), en réduisant la productivité ou en augmentant les coûts de production (par exemple, l'herbivorie, la concurrence pour l'eau, la perte d'habitat, le ruissellement des nutriments, la sédimentation des cours d'eau, les émissions de gaz à

effet de serre et la contamination par les pesticides des êtres humains et des espèces non ciblées) (Power, 2010).

Les flux de ces services et disservices écosystémiques dépendent de la manière dont les agroécosystèmes sont gérés (diversité, composition, fonctionnement) à l'échelle de la parcelle, mais aussi à celle de paysage (Zabala et al., 2021; Zhang et al., 2007) (Figure 1).

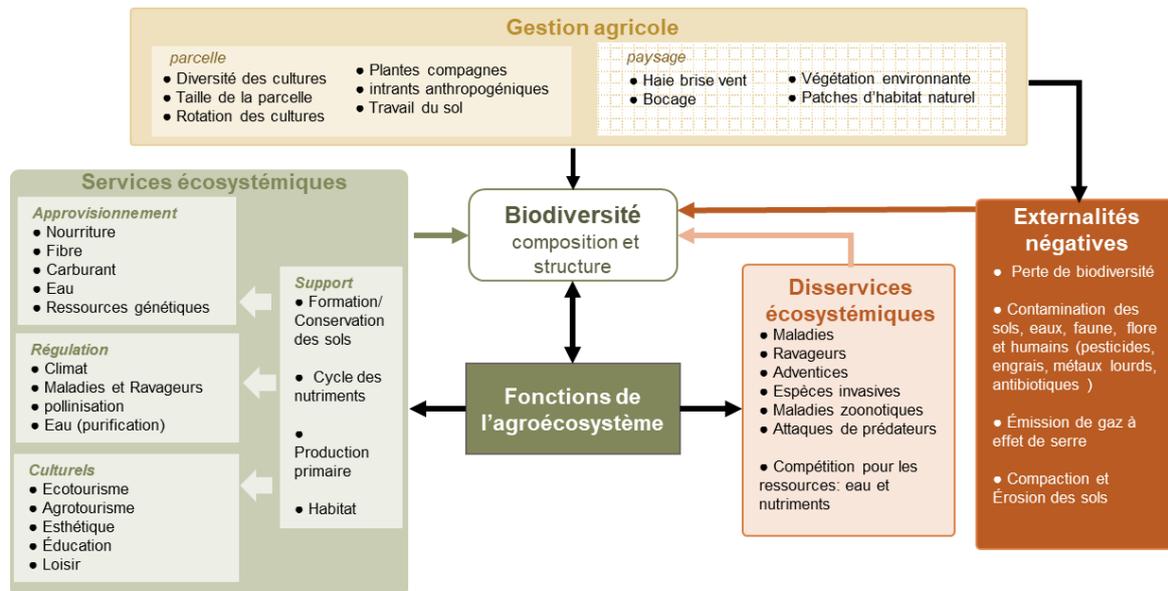


Figure 1 : Impacts de la gestion agricole (aux échelles parcelles et paysage) sur le flux de services et de disservices écosystémiques, ainsi que sur les externalité négative. (Adapté de (Power, 2010) et (Zhang et al., 2007)).

Aujourd'hui, il existe tout un gradient de modes de production agricole allant de l'agriculture conventionnelle fondée principalement sur l'utilisation des intrants d'origine anthropique, à l'agroécologie qui exploite la biodiversité pour promouvoir la production de services (Duru et al., 2015). Ces deux stratégies opposées conduisent à des types d'agroécosystèmes différents, qui génèrent plus ou moins de disservices selon le niveau d'intégration de la biodiversité comme levier pour la production de services. Plus le système est artificialisé et soutenu par des intrants d'origine anthropogéniques, plus il induit la production de disservices (Duru et al., 2015).

### 2.1.1.2. Le service de régulation des maladies et ravageurs

Dans le cadre de la transition agroécologique, la conception de systèmes de culture sans usage de pesticides chimiques se base sur la valorisation des processus écologiques sous-jacents les fonctions de l'écosystème, dont la régulation des M&R (Deguine et al., 2023).

La régulation naturelle des M&R résulte des processus assurés par la biodiversité pour contrôler les populations de M&R en diminuant le nombre d'individus et/ou leur impact sur les cultures. Les voies d'actions qui sous-tendent la régulation des M&R sont nombreuses et souvent interconnectées

(Ratnadass et al., 2012), et c'est par leur action simultanée que l'impact des M&R pourra être réduit à l'échelle de la plante, mais également à l'échelle de l'agroécosystème et du paysage (Figure 2). L'effet de la diversité végétale des agroécosystèmes sur les M&R varie en fonction des espèces cultivées ou non cultivées, des traits de vie de ces M&R, du profil des communautés d'ennemis naturels et des conditions du milieu (Malézieux, 2012; Ratnadass et al., 2012). Elles sont déterminées par la gestion du système qui va influencer la composition et la structure de la biodiversité, associée et planifiée, et donc les interactions au sein du système.

Le service de régulation correspond alors à la capacité globale d'un système géré, à favoriser des fonctions de régulation, et donc à réduire l'impact des M&R sur la production. **Par sa nature, le service de régulation est donc très complexe à appréhender et à quantifier, alors que c'est un enjeu majeur pour l'évaluation et la conception de systèmes plus durables.**

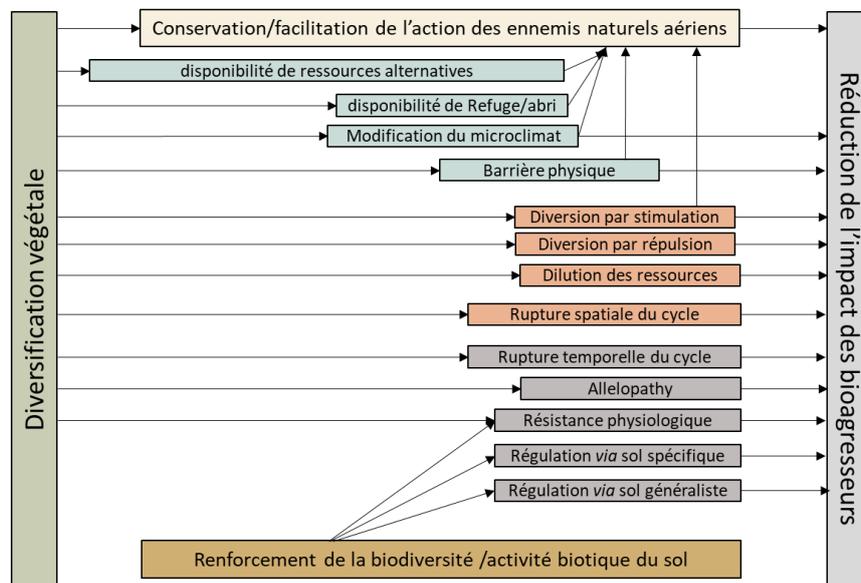


Figure 2 : Principales voies d'actions pour réduire l'impact des M&R par l'introduction d'une diversité d'espèces végétales dans les agroécosystèmes.(traduit de Ratnadass et al, 2012 (Ratnadass et al., 2012))

### 2.1.1.3. Les méthodes de protections des cultures

En protection des cultures, diverses méthodes sont mises en œuvre pour minimiser les dégâts causés par les M&R et favoriser des rendements agricoles, allant de celles basées uniquement sur l'utilisation de biocides d'origine chimique, à celles qui mobilisent des leviers reposant sur la biodiversité.

Aujourd'hui, en raison de leur efficacité à court terme et de leur facilité d'utilisation, l'utilisation de biocides chimiques représente la norme (allant de la lutte chimique intensive à la lutte chimique raisonnée), malgré les externalités négatives qu'elle provoque (destruction des habitats, altération des propriétés physico-chimiques du sol, acquisition de résistance dans les populations de M&R, pollution des sols et de l'eau, et contamination des populations humaines). Parmi les approches alternatives à l'utilisation de biocides chimiques, il existe :

- La lutte biologique classique qui mobilise l'utilisation d'agent de biocontrôle (les macros organismes auxiliaires comme les insectes, les acariens ou les nématodes ; les microorganismes comme les champignons, les bactéries et les virus ; les médiateurs chimiques

comme les phéromones d'insectes et kairomones ; et les substances naturelles d'origine végétale, animale ou minérale)

- La lutte biologique par conservation qui comprend l'ensemble des mesures prises pour la préservation des ennemis naturels indigènes, en empêchant leur destruction par d'autres pratiques et en augmentant leur efficacité, notamment par la gestion des habitats. Elle est donc par définition incompatible avec l'utilisation de biocides.
- La lutte culturale qui implique la manipulation des pratiques culturales, comme le choix des espèces cultivées, la rotation des cultures, la densité de plantation, la période de semis, la gestion des résidus de culture, l'aménagement du paysage agricole.
- La lutte physique qui implique l'utilisation de barrières physiques, de pièges, de filets, de bâches, de barrières électriques, de dispositifs mécaniques ou de techniques de manipulation manuelle pour limiter l'accès des ravageurs aux cultures, les piéger ou les éliminer directement.
- La lutte intégrée qui combine plusieurs méthodes de gestion pour obtenir une efficacité globale tout en minimisant l'utilisation d'intrants chimiques. La prophylaxie est également essentielle, impliquant des mesures préventives telles que la sélection de variétés résistantes, l'amélioration des pratiques culturales et la rotation des cultures pour limiter les risques d'infestation.

Plus récemment, la Protection Agroécologique des Cultures (PAEC) telle qu'établie par Deguine *et al* (2016), vise à concevoir des systèmes de culture qui favorisent la régulation des M&R. Elle repose principalement sur deux approches complémentaires. Premièrement, la lutte biologique par conservation cherche à augmenter l'abondance et la diversité des ennemis naturels, des ravageurs et des pollinisateurs dans les agroécosystèmes, tout en éliminant les pratiques qui leur sont préjudiciables. Deuxièmement, elle utilise des techniques culturales adaptées pour gérer les populations de M&R. Ces techniques impliquent l'ajustement ou la mise en valeur de pratiques agricoles qui, bien que n'étant pas initialement conçues pour protéger les cultures, contribuent à cet objectif. Cela inclut des éléments tels que le travail du sol, la rotation des cultures, la date et la densité des semis, la fertilisation et la couverture végétale du sol. De plus, la PAEC tire parti de l'utilisation de variétés de cultures moins sensibles ou tolérantes, ainsi que de méthodes de lutte physique.

La PAEC met donc l'accent sur **l'optimisation des pratiques culturales** et la **gestion des peuplements végétaux** pour **promouvoir** le maintien ou la création **d'habitats favorables aux communautés** animales et végétales utiles et/ou défavorables au développement de l'ensemble des M&R (maladies, ravageurs et adventices). La gestion de la richesse et de la composition des communautés dans les agroécosystèmes implique la prise en compte exhaustive des facteurs anthropiques pouvant exercer une influence directe ou indirecte sur celles-ci. Ainsi, l'attention portée à l'impact des facteurs écosystémiques et paysagers sur la diversité des groupes fonctionnels est primordiale. Ces facteurs incluent la nature des espèces impliquées, les interactions entre les différents niveaux trophiques, les pratiques culturales et phytosanitaires.

Par ces différentes voies d'actions combinées, la PAEC, comme les méthodes de protection basée sur l'application de biocides d'origine chimique, a pour objectif finalisé de réduire les pertes de récoltes causées par les M&R (Aubertot et al., 2007). Deux questions essentielles se posent alors, déterminantes :

- comment quantifier une perte de récolte - se limite-t-elle seulement aux pertes de biomasse récoltée?
- jusqu'à quel niveau cette perte (ces pertes, si celles-ci sont de dimensions différentes) est-elle acceptable ?

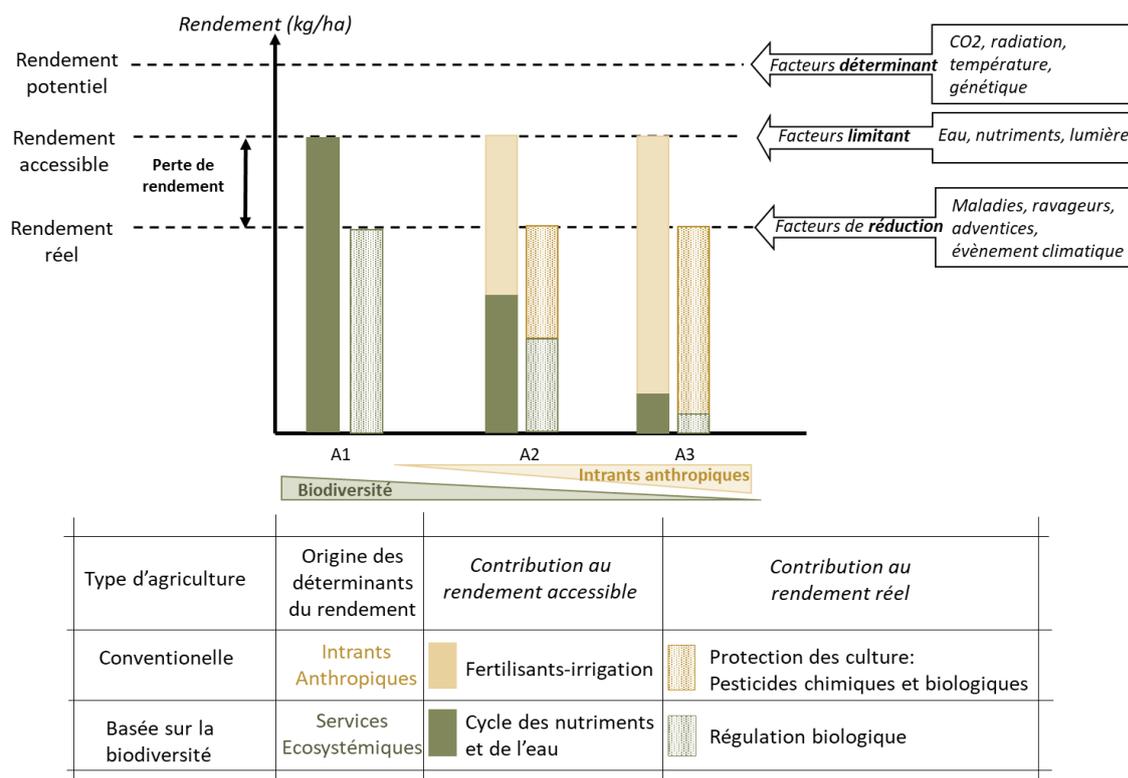
#### 2.1.1.4. *Maladies, ravageurs et pertes de rendements*

Les M&R provoquent de graves pertes de récoltes, menaçant la production agricole et réduisant la sécurité alimentaire et les revenus des agriculteurs. On estime qu'environ 20% de la production agricole totale est perdue à cause des M&R (Oerke, 2006), mais ce chiffre, très variable d'une culture à l'autre et dépendant de chaque situation de production, est finalement peu évalué compte tenu de la difficulté d'acquisition de cette donnée, particulièrement dans le cas de plantes pérennes.

En effet, les pertes de rendement dépendent à la fois de la combinaison des M&R présente à un temps  $t$  (ou profils de M&R), de la capacité de la plante à atteindre un rendement donné, pour un génotype dans un contexte spécifique de limitation des ressources (ou rendement accessible), et de l'impact du profil de M&R sur le rendement accessible (relation dégâts-dommages) (Nutter et al., 1993; Savary et al., 2006) (Figure 3). La perte de rendement correspond à la différence entre le rendement accessible et le rendement réel (Chiarappa, 1971; Zadoks and Schein, 1979).

En agriculture conventionnelle, les facteurs limitants et réducteurs sont compensés principalement par des intrants anthropiques, chimiques (engrais, et pesticides) ou biologiques (agent de biocontrôle), et l'irrigation. En agroécologie, ils sont compensés par les SE (fertilité des sols et régulation biologique) fournis par l'agroécosystème, en particulier par la biodiversité associée (Figure 3). Ainsi, dans le cas d'une situation de production qui pratique une agriculture basée uniquement sur la biodiversité (A1 dans la Figure 3), la perte de rendement correspond uniquement à la capacité du système à réguler les M&R, alors que dans une situation de production basée sur une agriculture conventionnelle (A2 et A3) dans la Figure 3, la perte de rendement correspondra à l'impact global des méthodes de protection des cultures mobilisées.

La perte de rendement est classiquement utilisée pour évaluer la capacité du système à réduire l'impact des M&R et comme une mesure de l'efficacité des méthodes de gestion mises en œuvre contre les M&R (Chiarappa, 1971). La distinction que nous ferons est que dans le cas de **systèmes basés sur la biodiversité**, la perte de rendement sera un **proxy du service écosystémique de régulation**, alors que dans le cas de **systèmes conventionnels**, il s'agira d'un indicateur reflétant **l'effet cumulé des pratiques de protection des cultures et du service de régulation**



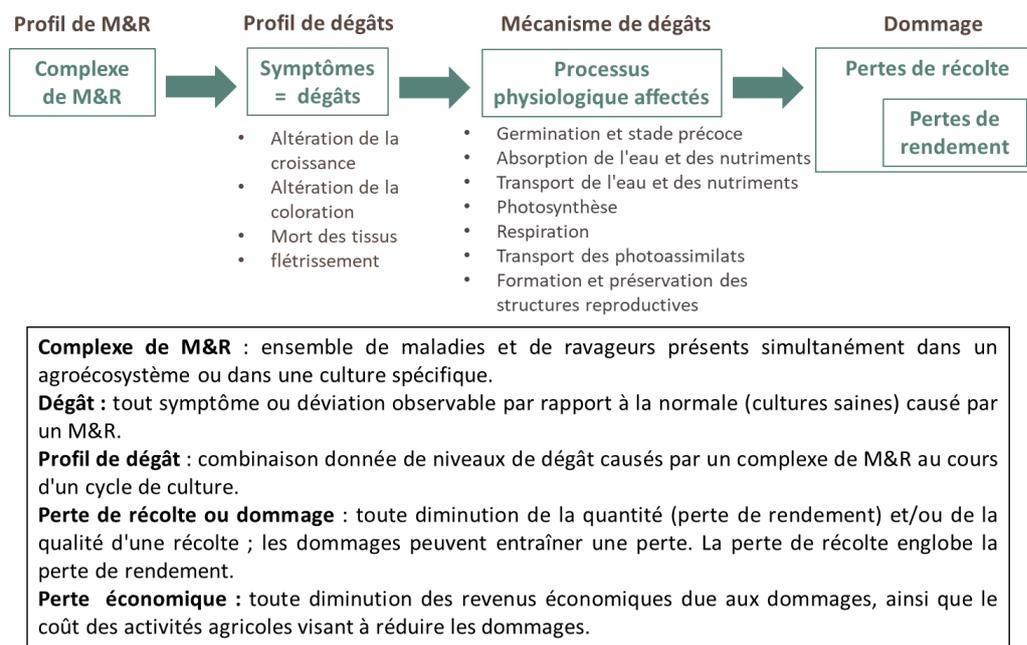
**Figure 3 : Représentation des différents niveaux de rendement déterminés par les facteurs qui les définissent, les limitent ou les réduisent (Nutter et al., 1993; van Ittersum et al., 2013), et conceptualisation de la contribution des intrants anthropiques par rapport aux services écosystémiques dans un gradient d'agroécosystèmes (allant de celui qui n'exploite que la biodiversité pour promouvoir la production de services écosystémiques (A1) à celui basé principalement sur l'utilisation d'intrants d'origine anthropique (A3)).** Pour cet exemple, les rendements accessibles et réels ainsi que les pertes ne varient pas dans ce gradient d'agroécosystèmes. Le rendement potentiel est défini par les "facteurs déterminants", le rendement accessible par les "facteurs limitants" (abiotiques) et le rendement réel par les "facteurs de réduction" (biotiques). Le rendement défini par les facteurs limitants est celui qui peut être atteint lorsque tous les facteurs de réduction sont compensés.

#### 2.1.1.5. Une approche systémique pour quantifier les pertes de rendements

Selon Aubertot et al (2007), une approche systémique est nécessaire pour appréhender les M&R comme faisant partie intégrante des agroécosystèmes, tout comme les sols, les plantes cultivées, les outils utilisés et les agriculteurs eux-mêmes (Rabbinge and de Wit, 1989). Comme les autres composants des agrosystèmes, les M&R sont influencés par des facteurs externes, tels que le climat, les contextes économiques (comme l'évolution des marchés agricoles), et sociaux (comme les savoirs et savoir-faire locaux). Les M&R des cultures impactent donc les performances des agroécosystèmes, positives ou négatives, comme les autres composants du système. Plusieurs auteurs soulignent l'importance de ne pas restreindre l'étude des M&R uniquement à des aspects tels que la dynamique des populations, leur écologie et leur génétique (Aubertot et al., 2007; Deguine Jean-Philippe, 2016). Bien que ces éléments soient indispensables pour comprendre le fonctionnement des systèmes, ils ne suffisent pas à une gestion durable des agrosystèmes, notamment en ce qui concerne les M&R.

La mise en œuvre d'une **démarche "multipest"**, permet de prendre en compte le compartiment M&R au sein du système et d'en étudier ces déterminants et son impact sur la production. Elle s'appuie sur le concept de **profil de dégâts** qui désigne une description quantitative et qualitative des dégâts causés par les M&R sur la culture, prenant en compte des indicateurs relatifs à l'incidence et à la sévérité des

symptômes (Figure 4). Il vise à évaluer l'impact des M&R sur la physiologie de la plante hôte et son fonctionnement, ou mécanisme de dégâts, et peut être relié à une perte de rendement. Les mécanismes de dégâts font référence aux effets des M&R sur les processus physiologiques impliqués dans la croissance des plantes et l'élaboration du rendement (Rabbinge and Rijsdijk, 1982; Willocquet et al., 2000). Malgré la grande diversité biologique et écologique des M&R qui peuvent affecter une culture, les mécanismes de dégâts induits par les M&R n'affectent la physiologie de la plante cultivée que d'un nombre limité de façons. La notion de **complexe de M&R** en revanche, englobe une analyse plus exhaustive des différents M&R présents dans un écosystème, incluant des informations sur leur diversité, leurs interactions, leurs cycles de vie, leur abondance relative, et leur prévalence dans la culture. Ces M&R peuvent interagir entre eux et avec l'environnement de manière complexe, entraînant des effets cumulatifs sur la santé et le développement des plantes cultivées.



**Figure 4 : représentation des relations entre profil de M&R, profil de dégât, mécanisme de dégât et dommage, et rappel des définitions.**

Le **concept de situation de production**, qui fait référence à l'ensemble des facteurs physiques, biologiques, techniques, sociaux et économiques desquels résulte la production agricole (Aubertot and Robin, 2013; De Wit and Penning de Vries, 1982), constitue une notion importante pour construire une démarche systémique. Une situation de production définit un rendement accessible, et de ce fait permet de quantifier les pertes de récoltes occasionnées par les M&R des cultures. À chaque situation de production correspond un rendement accessible et un rendement réel spécifiques, déterminés par les facteurs limitants et de réductions qui lui sont propres. Les profils de M&R et leur impact résultent de l'interaction entre l'environnement biophysique (y compris la plante hôte et les M&R), et les actions (pratiques de gestion) menées par l'agriculteur. Nous considérerons donc la situation de production en excluant les pratiques de gestion permettant ainsi d'étudier ces deux facteurs de manière indépendante. Elle est définie comme l'ensemble des composants biologiques, chimiques et physiques de l'agroécosystème, ainsi que les conditions socioéconomiques et environnementales (climat et topographie) qui l'influencent. Les profils de dégâts, les conditions physiologiques de la plante cultivée, le rendement et les pertes de rendement sont ainsi déterminés par une combinaison spécifique d'une situation de production et d'une stratégie de gestion adoptée dans chaque parcelle cultivée.

### 2.1.2. Une démarche de conception de systèmes de culture durables basée sur la fourniture de SE

La conception de systèmes de culture durables s'inscrit dans les trois dimensions de la durabilité : environnementale, économique et sociale. La durabilité environnementale repose sur la fourniture de SE plutôt que sur l'utilisation d'intrants chimiques, ce qui nécessite de prendre en compte les compromis entre SE comme outil d'évaluation et de conception des systèmes (Rapidel et al., 2015) [ACL5].

Dans une démarche de conception de systèmes de culture innovants (Lançon et al., 2007; Meynard et al., 2001), l'analyse des compromis entre SE peut être intégrée dans les deux principales étapes constituant la boucle de conception (l'évaluation et la conception) comme proposée par Rapidel *et al* (2015) [ACL5] et illustrée Figure 5.

#### 2.1.2.1. Phase d'évaluation

Une évaluation multicritère basée sur la production de SE implique des changements de paradigmes, à commencer par la définition même de l'objectif du problème à résoudre : le système de culture est une composante intégrante d'un territoire, ce qui nécessite d'inclure les acteurs aux différentes échelles impliquées pour identifier les SE cibles et les évaluer à une échelle adaptée (Figure 5-A, (1)). À l'échelle du système de culture et de l'exploitation, le principal SE ciblé est le plus souvent la production agricole et les revenus qui en résultent pour l'agriculteur. Mais ce service de production dépend lui-même d'autres SE, dont les mécanismes écosystémiques sous-jacents dépendent d'échelles spatiales différentes et souvent imbriquées, tels que le recyclage des nutriments ou la régulation des M&R à une échelle intermédiaire, ou la fourniture d'eau (quantité et en qualité), l'érosion des sols, et la conservation de la biodiversité à une échelle plus large (bassin versant, paysage).

Une fois que les SE permettant de résoudre le problème identifié ont été choisis, la première étape pour l'évaluation du système repose sur l'identification d'indicateurs appropriés (Figure 5-A, (1)). Ainsi la quantification des SE recherchés est nécessaire à l'évaluation des systèmes, et une étape préliminaire consiste à identifier des indicateurs intégratifs de ces services, facilement mesurable sur le terrain, qui puissent rendre compte de la valeur économique de ces services. Au-delà de la valeur économique liée au service de production, le coût des pratiques mobilisées en termes d'intrants, mais également de temps de travail et la pénibilité sont à prendre en compte dans une évaluation multicritère pour la co-conception de systèmes durables.

Le deuxième changement de paradigme par rapport à une méthodologie classique d'évaluation de systèmes de culture réside dans le fait de ne pas uniquement quantifier le système par un ou plusieurs critères indépendants les uns des autres, mais de prendre en compte les relations qui existent entre les différents SE étudiés, et d'analyser les éventuels compromis ou synergies qui peuvent exister entre les différents processus écologiques mobilisés. L'évaluation des systèmes de culture existants sur la base d'indicateurs de SE révèle une gamme de combinaisons de réponse, dans les limites d'une courbe d'enveloppe (ou frontières de Pareto, (Figure 5-A, (2))). L'évaluation consiste alors à quantifier l'écart entre la performance de chaque système de culture et une valeur de référence identifiée sur la courbe d'enveloppe, de manière similaire à une analyse de type « yield gap » mais généralisée à tous les SE étudiés (Figure 5-A, (3)).

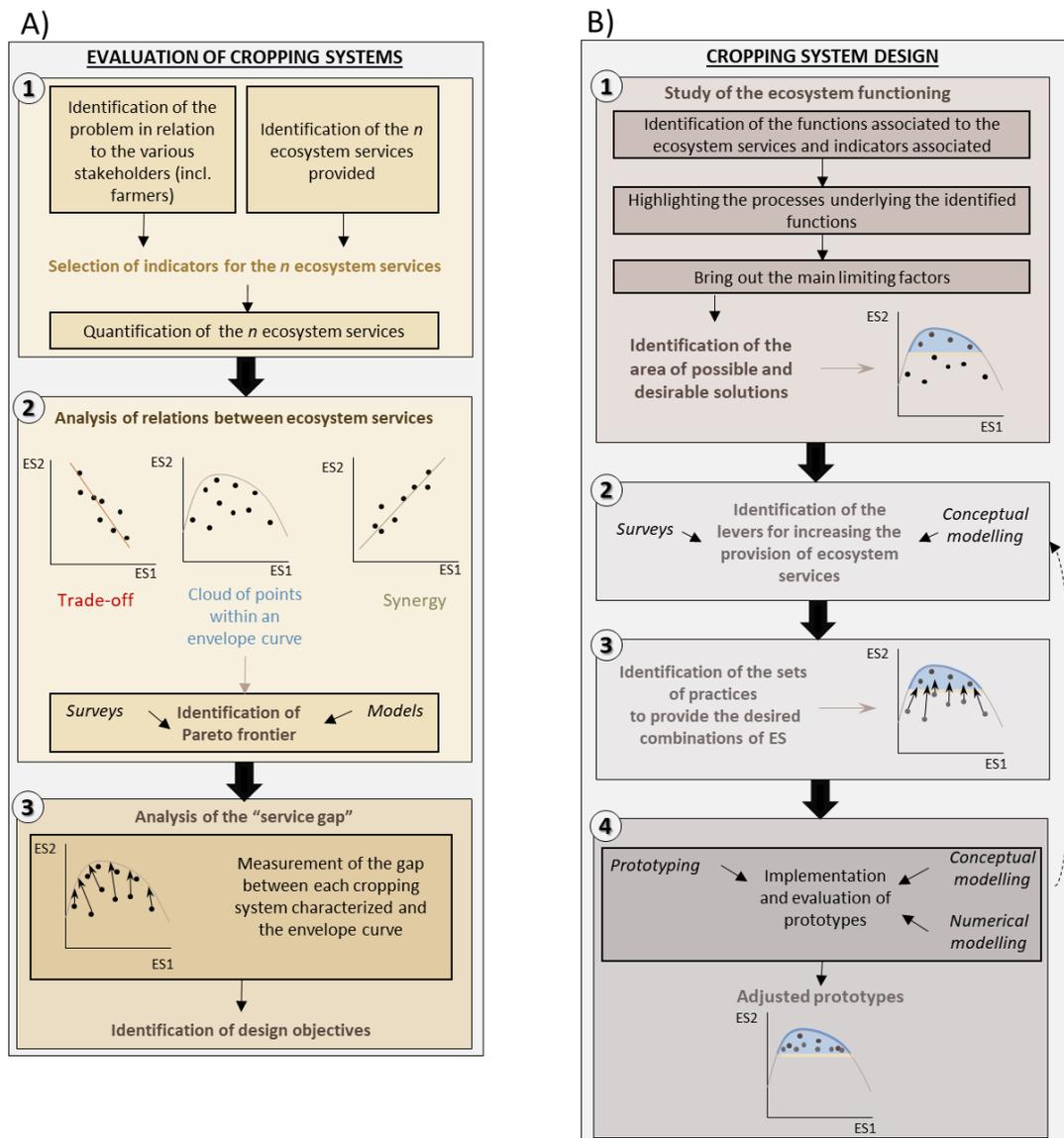


Figure 5 : Représentation des 2 principales étapes A) évaluation et B) conception) constituant la démarche de conception de systèmes de culture durable basée sur l'analyse des compromis entre services écosystémiques. Les numéros indiquent les différentes cases mentionnées dans le texte (Rapidel et al., 2015) [ACL5].

#### 2.1.2.2. Phase de conception

Dans la phase de conception (Figure 5-B), les objectifs à atteindre, en termes de fourniture de SE, doivent être discutés et probablement négociés entre les parties prenantes. Les résultats de l'évaluation et la description des relations entre les SE, voire l'absence de toute relation peuvent être très utiles pour alimenter cette discussion et mobilisé comme outil de co-conception (Meylan, 2012; Rapidel et al., 2015).

L'objectif est d'identifier la zone dans laquelle les relations entre SE répondent aux attentes, et que l'on appelle l'air des solutions possibles et désirables (Figure 5-B, (1)).

Une fois cette zone identifiée, il s'agit de caractériser les processus sous-jacents la provision des SE en les reliant aux fonctions écosystémiques associées, afin d'expliquer leur variabilité de réponse et d'identifier les leviers mobilisables pour améliorer la production de SE (Figure 5-B, (2)). Les contraintes ainsi que les opportunités, biophysiques ou socio-économiques, sont identifiées, en lien avec les acteurs.

De nouvelles options techniques sont alors envisagées visant à activer les leviers précédemment identifiés (Figure 5-B, (3)). Cela implique de pouvoir relier des pratiques avec la production de SE et donc avec les processus écosystémiques associés, comme développé dans le point suivant.

La dernière phase comprend les étapes de conception de prototypes avec la participation des acteurs, leur mise en œuvre, et leur évaluation sur le terrain (Figure 5-B, (4)).

### 2.1.3. Modèle d'étude : les systèmes agroforestiers à base de caféiers

#### 2.1.3.1. Le café Arabica

Le genre *Coffea* est originaire d'Afrique et comprend plus de 130 espèces reconnues (Anthony et al., 2011). Cependant, en raison des préférences de consommation, de l'histoire et des maladies, seules deux espèces principales de café sont cultivées aujourd'hui. *Coffea arabica* (Arabica) est la principale espèce cultivée, représentant aujourd'hui environ 60% des exportations, la seconde espèce est *Coffea canephora* (Robusta), représentant près de 40 % de la production mondiale. La troisième espèce, *Coffea liberica* (Liberica), est marginale, avec une part de la production mondiale inférieure à 1 %. L'arabica atteint les prix les plus élevés en raison d'une meilleure qualité à la tasse. Le café est cultivé dans plus de 70 pays à travers les tropiques (Ico, 2019).

*Coffea arabica* est une plante de sous-bois originaire des forêts tropicales d'un territoire réduit des hauts plateaux éthiopiens, dans des zones fraîches (Anthony et al., 2011). Il est majoritairement autogame et c'est la seule espèce de *Coffea* allotetraploïde (les autres sont diploïdes) :  $2n=4X=44$ . Cette espèce semble provenir d'un événement récent et probablement unique d'hybridation entre deux espèces diploïdes, *Coffea canephora* et *Coffea eugenoides* (Lashermes et al., 1999). La sélection génétique consiste à augmenter la diversité des cultivars pour mieux faire face à des problèmes causés par le changement climatique : augmentation des menaces des M&R et diminution du rendement et de la qualité du café (van der Vossen et al., 2015).

*C. arabica* est une espèce adaptée à l'ombre (Cannell, 1985; DaMatta, 2004), mais qui est maintenant cultivée en monoculture (en plein soleil), et dans une large gamme de SAFs, y compris des systèmes d'ombrage monospécifiques, d'autres SAFS avec des arbres d'ombrage diversifiés, et même des agroforêts complexes de type forestier.

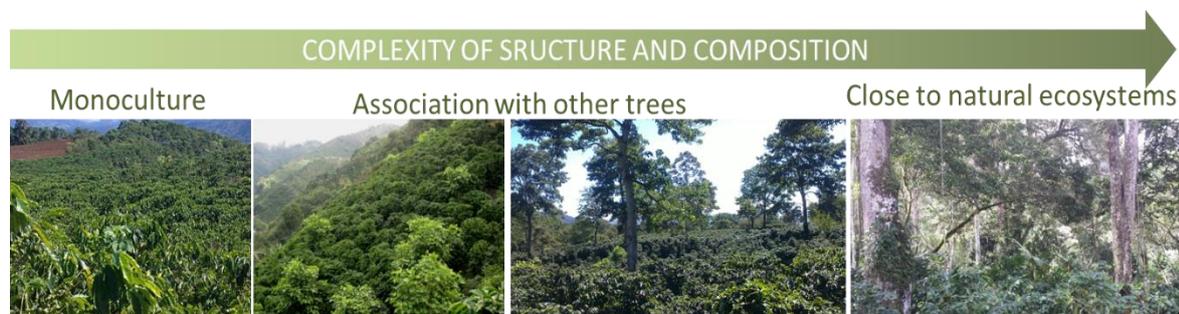


Figure 6 : Gradient de complexité dans les systèmes agroforestiers à base de café (issus de (Avelino et al., 2018) [ACL13])

### 2.1.3.2. Les principales M&R du caféier

Les M&R du caféier peuvent entraîner différentes pertes de rendement et de qualité en fonction de l'organe affecté et de la dynamique des dommages. Elles peuvent entraîner des pertes primaires en réduisant le rendement (et la qualité) l'année de l'épidémie et des pertes secondaires les années suivantes (Zadoks and Schein, 1979). Certaines sont communes aux différentes espèces cultivées, d'autres sont spécifiques, nous ne présenterons ici que celles qui affectent *Coffea arabica* et qui constituent les complexes de M&R étudiés.

#### Maladies majeures :



La **rouille du caféier**, causée par *H. vastatrix*, spécifique à *Coffea* spp. a une distribution mondiale. La maladie peut provoquer une défoliation importante et la mort des branches, entraînant des pertes primaires et secondaires. La rouille est originaire d'Afrique, comme le café, et était au centre des préoccupations en Amérique latine avant 1970, lorsqu'elle a été introduite au Brésil. À cette époque, toutes les zones caféières d'Amérique latine étaient plantées de cultivars génétiquement très homogènes et sensibles à la rouille. Le risque d'épidémie était donc élevé, comme sur l'île de Ceylan, où les plantations de café ont été détruites par le pathogène à la fin du dix-neuvième siècle (Avelino et al., 2018). Cependant, peu après son apparition en Amérique latine, la maladie, qui était gérée principalement par des fongicides, n'était plus considérée comme une menace. La rouille est réapparue en 2008 en Colombie, en 2012 en Amérique centrale, au Mexique et dans les Caraïbes, et en 2013 au Pérou et en Équateur. En Colombie, la rouille a entraîné une baisse moyenne de la production de 31 % entre 2008 et 2011 par rapport à 2007 (Avelino et al., 2015). En Amérique centrale, la production a diminué de 16 % lors de la récolte 2012/2013, l'année de l'épidémie, par rapport à 2011/2012, et de 21 % l'année suivante (ICO, 2018). La résurgence de la maladie a été attribuée à une combinaison de facteurs économiques et météorologiques : une faible rentabilité du café, entraînant une gestion sous-optimale des plantations, et une augmentation des températures minimales, réduisant probablement la période de latence de la maladie (Avelino et al., 2015).



*Mycena citricolor* qui est l'agent causal de la **maladie de la tache Américaine** du café, est une nouvelle maladie du café en Amérique latine. *Mycena. citricolor* a une large gamme d'hôtes, y compris les arbres d'ombrage utilisés dans les plantations de café ainsi que les mauvaises herbes (Granados Montero, 2015). Lorsque les conditions sont favorables - c'est-à-dire lorsque les précipitations sont abondantes et réparties de manière homogène au cours de l'année et que les températures sont fraîches - les pertes de rendement dans les plantations de café peuvent être presque totales (Avelino et al., 2007). *Mycena citricolor* infecte les feuilles, les fruits et les branches. Les lésions foliaires sont les plus graves, car elles peuvent entraîner des défoliations sévères et la mort des branches, ce qui provoque d'importantes pertes de rendement primaires et secondaires. Les dégâts sur les fruits peuvent les faire tomber et entraîner des pertes de rendement primaires élevées. Les dégâts sur les branches sont moins fréquents et n'ont pas d'impact sérieux sur le rendement. La dernière épidémie grave à l'échelle de la région Amérique centrale Colombie a eu lieu en 2010 (Granados Montero, 2015).



L'importance des **nématodes** parasites dans systèmes de culture à base de caféier est probablement sous-estimée, étant donné la difficulté de détecter et d'évaluer les lésions et l'expertise requise pour identifier correctement leur cause. L'impact des nématodes a été documenté en Amérique latine, en particulier au Brésil et en Amérique centrale, ainsi qu'en Asie. En Amérique latine, les **nématodes à galles** (*Meloidogyne* spp.) sont considérés comme les nématodes les plus importants. Les principales espèces de *Meloidogyne* sont *Meloidogyne exigua*, *Meloidogyne incognita* et *Meloidogyne paranaensis* (Campos et al., 2005; Souza and Bressan-Smith, 2008). Cependant, en Asie, les **nématodes provoquant des lésions racinaires** (*Pratylenchus* spp.) sont généralement considérés comme dominants (Campos et al., 2005). *Pratylenchus coffeae* et *Pratylenchus brachyurus* sont les espèces les plus répandues (Souza, 2008). La production des caféiers attaqués par les nématodes diminue progressivement, ce qui laisse supposer d'importantes pertes de rendement secondaires. Cependant, lorsque les conditions environnementales sont défavorables au caféier, les pertes de rendement peuvent être importantes dès la première année de forte production de fruits, lorsque la demande en nutriments est élevée, ce qui entraîne un dépérissement précoce et important des branches, voire la mort des caféiers (Souza, 2008; Villain et al., 2000).



La mort régressive des branches (**Dieback**) est un dégât courant causé par un syndrome complexe répandu au niveau mondial. Ce syndrome, qui entraîne d'importantes pertes de rendement primaire et secondaire, est lié à des déséquilibres physiologiques dus à un excès de fruits (entraînant un déséquilibre dans la relation source-puit), à une forte défoliation due à des M&R telle que la rouille du caféier ou des nématodes, et à des stress tels que les chocs thermiques. Des champignons opportunistes, dont un dominant, *Colletotrichum gloeosporioides*, peuvent aggraver ce problème physiologique (Chen et al., 2003; Freitas et al., 2013; Waller et al., 2007). Des lésions sur les feuilles et les baies dues à *C. gloeosporioides* sont également souvent visibles et constitue le principal agent infection de l'**Anthraxnose**, en association avec d'autres espèces de *Colletotrichum* spp.

#### **Maladies moins importantes en termes d'incidence et de sévérité (et sont souvent moins documentées) :**



La **cercosporiose**, provoquée par *Cercospora coffeicola*, qui provoque des lésions foliaires. La présence d'arbres d'ombrage permet de contrôler la maladie, en régulant la température et l'interception de la lumière nécessaire à la biosynthèse de la cercosporin (Silva et al., 2016). Les dégâts qu'elle occasionne semblent également liés à une carence en azote, qui entraîne une augmentation de son incidence et de la sévérité (Waller et al., 2007).



Le **phoma du caféier** est dû à une infection provoquée par *Phoma costarricensis* qui entraîne des taches sombres ou nécrotiques sur les feuilles, réduisant la surface de photosynthèse, et peut également provoquer la mort progressive des branches (ou Dieback)(Waller et al., 2007). C'est une maladie de haute altitude, où les températures sont plus fraîches (17-24°C), ce qui favorise la croissance mycélienne et la colonisation des tissus (Reymond et al., 2003).



La **pourriture du fil** ou maladie de la toile est provoquée par le champignon *Corticium koleroga*, qui affecte les feuilles et provoque leur chute, bien que les feuilles mortes restent suspendues par le tissu mycélium qui bouche les stomates des feuilles et gêne les échanges gazeux avec l'atmosphère (Waller et al., 2007). *Corticium koleroga* est localisée dans les zones les plus humides et possède de nombreuses plantes-hôtes, y compris les arbres présents dans les parcelles agroforestières (Waller et al., 2007).

#### Ravageurs principaux :



*Coffea arabica* est affecté par un certain nombre d'espèces d'insectes, le plus important et le plus répandu étant le **scolyte du caféier**, *Hypothenemus hampei*. Cet insecte est très spécifique au caféier, bien que les adultes puissent occasionnellement infester d'autres plantes (Damon, 2000). La femelle fécondée perce un trou dans la baie de café et pond ses œufs dans l'endosperme du café, qui est consommé par les larves. Seul un des deux grains du fruit du caféier est généralement attaqué. Les pertes de rendement primaires résultent d'une réduction du rendement due aux galeries d'insectes et à la consommation des grains par les insectes, ainsi qu'à la chute des jeunes fruits verts jugés impropres à l'infestation, qui tombent après avoir été sondés et abandonnés par le scolyte (Damon, 2000; Vega et al., 2009). La qualité du café est affectée sous trois aspects : (a) les trous et les galeries dans le grain entraînent une diminution de la qualité physique ; (b) le développement d'arômes indésirables provenant des grains infestés et souvent pourris a un impact négatif sur la qualité organoleptique ; et (c) l'infestation par le scolyte constitue un problème sanitaire, car les grains infestés peuvent contenir des toxines fongiques, y compris l'ochratoxine A, une toxine néphrotoxique et cancérigène produite par *Aspergillus ochraceus* (Ribeyre et al., 2012).



Les **mineuses des feuilles** du genre *Leucoptera* sont particulièrement problématiques au Brésil et en Afrique de l'Est. Ces papillons pondent leurs œufs sur la surface supérieure des feuilles. Les larves rongent le tissu foliaire, formant des galeries et des lésions (Waller et al., 2007). Ces lésions peuvent entraîner une réduction de la surface photosynthétique et de fortes défoliations, ce qui se traduit principalement par des pertes de rendement secondaires (Guerreiro Filho, 2006).

#### 2.1.3.3. Les enjeux liés à la culture du café

##### Une filière de rente d'exportation en expansion :

La consommation mondiale de café continue de croître à un rythme annuel de 2 à 3 pour cent. Cultivé principalement dans les zones tropicales humides, le café représente une source de revenus essentielle pour les économies rurales des pays en développement. On estime que plus de 12 millions de familles d'agriculteurs dans le monde dépendent de cette culture pour leur subsistance (Ico, 2019). Cependant, les terres consacrées à la culture du café sont de plus en plus touchées par la dégradation de l'environnement, notamment la déforestation, l'érosion des sols et la perte de biodiversité, en raison des effets du changement climatique. En réponse à ces défis, un nombre croissant d'acteurs du secteur public et privé plaident en faveur d'une agriculture "régénératrice" et "durable" pour la production de café. Ces approches s'appuient sur les trois piliers de la durabilité : environnemental, économique et social

## **Impact du changement climatique et de la volatilité des marchés sur la durabilité des systèmes caféiers :**

La production de café a doublé au cours des 30 dernières années, atteignant plus de 169 millions de sacs en 2018 (Ico, 2019). Pour répondre à cette demande croissante, certains pays comme le Brésil et le Vietnam ont augmenté les rendements, tandis que d'autres ont augmenté leurs surfaces cultivées entraînant une déforestation significative (2 million d'ha, soit 1,62% de toute la déforestation liée à l'agriculture entre 2001 et 2015) et une réduction de l'autosuffisance alimentaire (Dow Goldman et al., 2020). L'expansion des zones de culture du café a eu un impact majeur sur la biodiversité, menaçant plus de 19 des hot-spots mondiaux de biodiversité dans les tropiques. Malgré la croissance de la demande, le marché du café connaît des déséquilibres et une répartition inégale des revenus, ce qui affecte les moyens de subsistance des petits producteurs (Fao, 2022). Le secteur du café a connu des cycles d'essor et de crise, influencés par des événements climatiques tels que les sécheresses et les gelées au Brésil, ainsi que par la pandémie de COVID-19 en 2020.

Dans ce contexte, il est attendu que le changement climatique aggrave les vulnérabilités existantes et en crée de nouvelles, obligeant de nombreux petits exploitants à adopter des moyens de subsistance alternatifs (Jawo et al., 2022; Pham et al., 2019). Les zones propices à la production de café vont évoluer d'ici 2050 (Bunn et al., 2015), principalement à cause de l'augmentation des épisodes de sécheresse (Kath et al., 2022), de la température et des épidémies de M&R telles que le scolyte du caféier (Jaramillo et al., 2011), la rouille du caféier (Zewdie et al., 2021) et le foreur de la tige du caféier (*Monochamus leuconotus P.*) (Kutywayo et al., 2013). Il est également attendu une diminution de la quantité et de la qualité des rendements en raison des impacts négatifs sur la floraison, la fructification et la qualité des grains (Tavares et al., 2018).

## **Hétérogénéité mondiale des systèmes caféiers :**

Des exploitations de petites et grandes échelles sont présentes dans tous les pays, mais leur répartition à travers le monde est clairement hétérogène. Les petits exploitants (<5 ha) représentent 95% des producteurs mondiaux de café et produisent environ 80% du café mondial (2019), malgré des rendements modestes (typiquement de 500 à 1 000 kg/ha/an de grains de café vert) et une utilisation faible à modérée d'intrants externes (International Trade, 2021) (Figure 7). La production restante provient de grandes exploitations (> 5 ha), dont moins de 1% dépassent 20 ha (2021), mais qui se caractérisent par des niveaux élevés d'engrais (> 500 kg/ha), une densité faible à nulle d'arbres d'ombrage et des rendements élevés de grains de café vert (> 1,5 t/ha). Cependant, ces pratiques intensives sont également mises en œuvre sur de petites surfaces, comme au Vietnam.

Cette structuration de la filière définit à mon sens les défis principaux auxquels doit faire face la filière café dans le contexte mondial du changement climatique:

- 1) Comment rendre les systèmes intensifs et peu diversifiés, durables sur le plan environnemental tout en maintenant la rentabilité et en réduisant les risques ?
- 2) Comment rendre les systèmes traditionnels et diversifiés, rentables sur le plan économique et équitable sur le plan social sans réduire les SE fournis ?

Par rapport à mon projet de recherche, focalisé sur la conception de systèmes agroforestiers à base de caféiers durables sous pression des M&R, ces deux questions impliquent de s'interroger de manière distincte quant à l'effet de la biodiversité associée dans les systèmes. Dans le cas de la première question, il s'agit d'étudier l'effet de la diversification sur la production de SE, y compris la régulation des M&R, et sur la durabilité des systèmes. L'enjeu est de réduire les di-services générés par

l'agriculture conventionnelle. Dans le cas de la 2<sup>e</sup> question, il s'agit plutôt de comprendre comment la diversification des systèmes sans usage d'intrant anthropiques sous-tend le service de régulation.

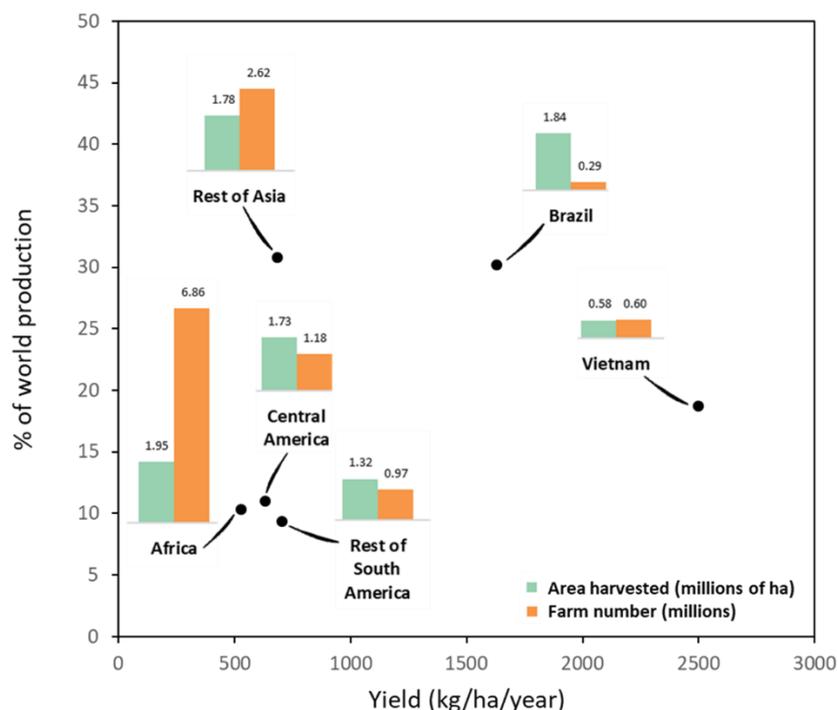


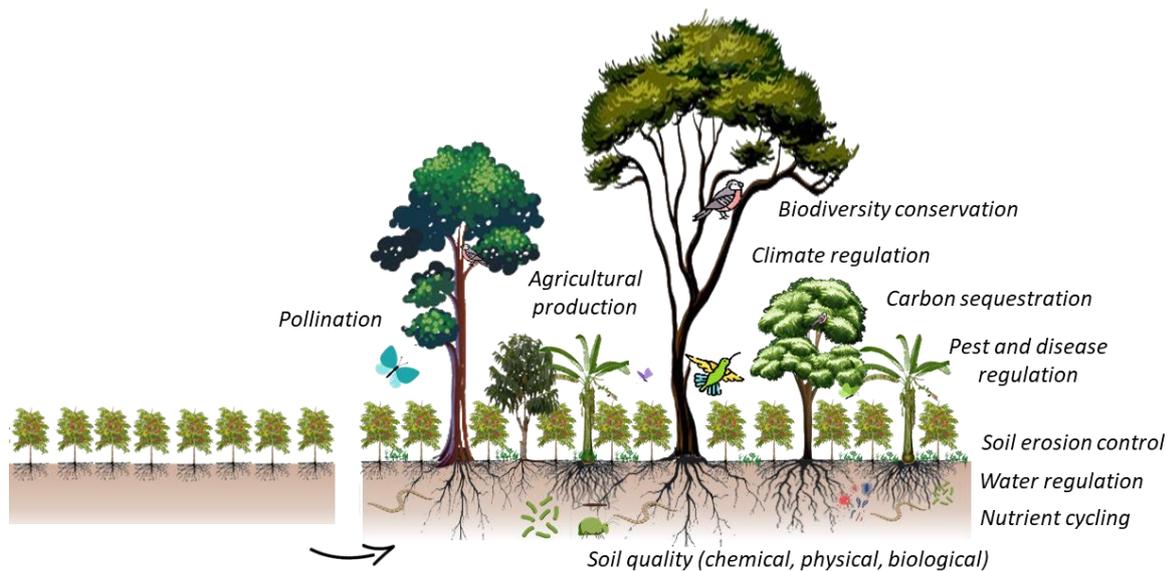
Figure 7 : Représentation des principales régions productrices de café (Arabica et Robusta inclus), selon leur productivité (rendement moyen par hectare) et leur contribution à la production mondiale (exprimée en pourcentage de la production mondiale). La superficie récoltée et le nombre d'exploitations dans chaque région sont spécifiés par des diagrammes en barres. Les pays considérés sont le Brésil et le Vietnam comme les plus productifs ; l'Éthiopie, le Kenya, l'Ouganda, le Rwanda, le Burundi, la République-Unie de Tanzanie, le Cameroun et le Togo pour l'Afrique ; le Laos, l'Indonésie et la Chine pour le reste de l'Asie ; le Mexique, le Guatemala, El Salvador, le Honduras, le Nicaragua et le Costa Rica pour l'Amérique centrale ; et la Colombie, l'Équateur et le Pérou pour le reste de l'Amérique du Sud. Source des données : ITC -Enveritas et FAO. (Issus de (Poncet et al., 2024) [ACL25])

#### 2.1.3.4. L'agroforesterie comme levier : Impact de la diversification sur le système de culture

Les SAFs génèrent une diversité de SE (Jose, 2009; Rapidel et al., 2011) qui, par rapport à la monoculture, contribue à améliorer la durabilité économique, sociale et écologique des systèmes comme illustré Figure 8 (Beer et al., 1997; Elevitch et al., 2018; Toledo and Moguel, 2012; Tscharrntke et al., 2011).

Les arbres d'ombrage offrent un **habitat favorable** pour un grand nombre d'espèces, telles que les oiseaux, des arthropodes et des champignons, dont l'impact sur la régulation des M&R, en tant qu'ennemis naturels, a été étudiée et documentée (Staver et al., 2001; Toledo and Moguel, 2012).

Les arbres d'ombrage ont un effet significatif sur les **conditions microclimatiques**, en atténuant les extrêmes de température de l'air, des feuilles et du sol, en réduisant la vitesse du vent et l'exposition au rayonnement solaire, tout en limitant les variations d'humidité du sol. Cependant, la présence d'arbres d'ombrages entraîne une augmentation de l'humidité relative de l'air et favorise la mouillure des organes végétaux (Avelino et al., 2004; López-Bravo et al., 2012).



**Figure 8 : Effets de la diversification du café par l'agroforesterie sur la fourniture de services écosystémiques (mentionnés en italique).** (Issus de Poncet *et al* 2014 [ACL25])

En interceptant la lumière, les arbres d'ombrage **contrôlent le couvert végétal**, en particulier les plantes herbacées (Beer et al., 1997; Soto-Pinto et al., 2002). Les SAFs contribuent également à la **séquestration du carbone** et son stockage dans le sol (Jose and Bardhan, 2012). Les arbres d'ombrage dans les SAFs peuvent fournir des services de régulation supplémentaires en **réduisant le ruissellement** en surface et **l'érosion du sol** (Gómez-Delgado et al., 2011). Les SAFs améliorent également la **qualité de l'eau** et permettent une fourniture régulière d'eau à des fins de consommation humaine ou de production hydroélectrique (Locatelli et al., 2011).

Les SAFs contribuent à l'amélioration de la **qualité des sols** et ainsi à leurs propres ressources environnementales (Beer et al., 1997; Haggan et al., 2011). Les arbres d'ombrages réduisent l'acidité du sol en augmentant sa teneur en bases, en particulier le potassium, grâce à leurs restitutions en matière organique (Hairiah et al., 2006). Ils fournissent de l'azote, particulièrement quand il s'agit d'arbres légumineux, dont la chute de feuilles et les résidus de taille peuvent produire jusqu'à 340 kg d'azote par hectare par an (Beer et al., 1997). De plus, ils augmentent la biodiversité du sol, particulièrement les populations de vers de terre (Hairiah et al., 2006; Sauvadet et al., 2018).

En plus de la production de café, les SAFs produisent **d'autres services d'approvisionnement**. Ils contribuent aux moyens de subsistance des agriculteurs sous forme de **nourriture**, de **plantes médicinales**, de **bois de chauffage** et de **matériaux de construction**, diversifiant les revenus et réduisant ainsi la dépendance économique à l'égard de la culture principale du café (Beer et al., 1997; Vignola et al., 2022). Ainsi, les SAFs, et particulièrement Les agroforêts traditionnelles, ont également des implications sociales et politiques. Leur présence contribue à la justice sociale en renforçant l'autosuffisance locale et en promouvant indirectement l'autonomie locale. Dans les régions tropicales, où les agriculteurs locaux maintiennent des systèmes à usages multiples, les organisations paysannes locales ou régionales reconnaissent, défendent et promeuvent ces systèmes diversifiés parce qu'ils sont identifiés comme des mécanismes tampons contre les perturbations économiques et les pressions politiques (Toledo and Moguel, 2012).

Enfin, les SAFs contribuent à la fourniture de **services culturels**. Les agroforêts traditionnelles de café ne conservent pas seulement des êtres vivants, mais aussi des cultures vivantes. Ainsi, les SAFs sont

surtout rependus dans des pays considérés comme culturellement mégadivers (Indonésie, Inde, Mexique, Cameroun, Philippines), dont beaucoup de petits exploitants appartiennent à une culture indigène donnée (Toledo and Moguel, 2012). Le développement de l'écotourisme favorise la protection des systèmes complexes, traditionnels et culturellement établis.

Par ailleurs, la modification du microclimat dans les SAFs influence la physiologie de la plante de café et son rendement, en quantité et qualité (Muschler, 2009). Les arbres d'ombrage stabilisent le rendement au fil des ans en réduisant l'effet de la biannualité sur la production (Cannell, 1985; Charbonnier et al., 2017; DaMatta, 2004), assurant ainsi des revenus plus stables aux producteurs. De plus, en prolongeant la durée de maturation des baies, les arbres d'ombrage ont un effet sur la qualité (Muschler, 2009; Muschler, 2001; Vaast et al., 2006). Les effets sur la stabilité du rendement et la qualité contribuent à accroître les services d'approvisionnement à long terme.

Enfin, l'ensemble des SE fournies par les SAFs peuvent interagir de manière synergique ou, à l'inverse, antagoniste. Il est crucial de prendre en compte ces interactions pour assurer aux agriculteurs la meilleure combinaison de SE, répondant à leurs besoins tout en garantissant la durabilité du système (Nelson et al., 2009; Vaast and Somarriba, 2014).

#### 2.1.4. Ma démarche et mes questions de recherches

Le projet de recherche que j'ai construit depuis 2011 vise à générer des connaissances pour concevoir des systèmes agroforestiers à base de caféier sous pression de M&R qui soient durable économiquement, socialement et écologiquement.

Je cherche à explorer les marges de manœuvre dont disposent les agriculteurs pour réduire les pertes économiques liées aux M&R et à leur mode de gestion (pertes de rendement et usage de pesticides) en mobilisant la biodiversité dans leurs systèmes, tout particulièrement les arbres d'ombrages.

Dans une perspective d'agroécologie, j'explore donc la manière de **mobiliser la diversité des arbres d'ombrage dans les systèmes agroforestiers comme levier pour minimiser l'impact des M&R sur le rendement.**

Cela m'a amené à construire mes questions de recherches autour de différents objets d'études, reliés entre eux comme illustré dans la Figure 9.

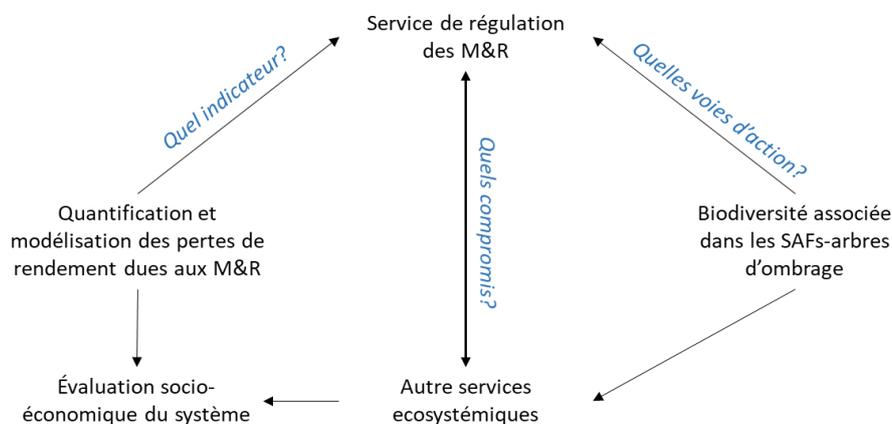


Figure 9 : Articulation entre les principaux objets d'études mobilisés dans ma démarche.

Tout d'abord, je cherche à **comprendre comment la diversification des systèmes conventionnels à base de caféiers en systèmes agroforestier influence les pertes de rendement dues aux M&R** ? Cela a nécessité d'abord de savoir :

- Comment quantifier les pertes de rendement primaires et secondaires du café et caractériser leur dynamique?
- Comment évoluent les pertes de rendement et leur dynamique en fonction du niveau d'intensité de gestion ?
- Quelles sont les pertes économiques associées à un niveau d'intensité de gestion donné?

Cette première question de recherche m'a amenée à une construire une approche de modélisation des pertes de rendements associées au complexe de M&R du caféier.

Je m'interroge également sur **comment prendre en compte les compromis induits par la présence d'arbres d'ombrages dans les systèmes étudiés, et cela à différentes échelles** ? :

- Comment prendre en compte les effets antagonistes des arbres d'ombrages sur le complexe de M&R ?
- Comment les arbres d'ombrage impactent-ils le compromis entre le rendement et service de régulation des M&R ? Ce qui implique de disposer d'un outil pour évaluer le service de régulation
- Comment la diversification des arbres d'ombrage affecte la production de SE et les compromis entre eux ?
- Comment évaluer un système sur la base des compromis entre SE ?

Enfin, je cherche également à révéler **quelles voies d'actions sous-tendent le service de régulation des M&R au sein du système et à caractériser l'effet de la diversité des arbres d'ombrages sur les processus de régulation des M&R** ?

- Comment caractériser ces voies d'actions?
- Comment intégrer les effets d'interactions au sein du système?
- Comment l'organisation de la diversité cultivée permet de limiter l'impact des M&R sur la production ?

Pour cela je me suis concentrée sur la culture de café en système agroforestier diversifié et biologique qui constitue un terrain idéal pour rechercher des mécanismes de régulations naturelles des M&R du café.

Pour construire mes questions de recherches, je me base sur plusieurs hypothèses et je considère que:

- Les pertes de rendement causés par les M&R est un proxy sur service de régulation
- Le service de régulation est la résultante de l'ensemble des voie d'actions sous-tendues par la biodiversité
- Il est possible d'optimiser le service de régulation par une gestion adéquate de la biodiversité – i.e des arbres d'ombrages (composition et structure).
- Il est possible de concevoir des systèmes socio-économiquement et écologiquement durable en optimisant les compromis entre SE
- La gestion de la biodiversité est un levier pour optimiser les compromis entre SE

## 2.2. EFFET DE LA DIVERSIFICATION ET DES PRATIQUES CULTURALES SUR LA DURABILITE DES SYSTEMES CONVENTIONNELS

### 2.2.1. Comprendre les déterminants des profils de dégâts : Analyse de l'effet de la situation de production et des pratiques sur le complexe de M&R et le rendement

J'ai tout d'abord cherché à comprendre, de manière systémique, **quels étaient les principaux facteurs qui déterminent les profils de dégâts** en lien avec le **rendement accessible** de la culture et la **diversification du système**.

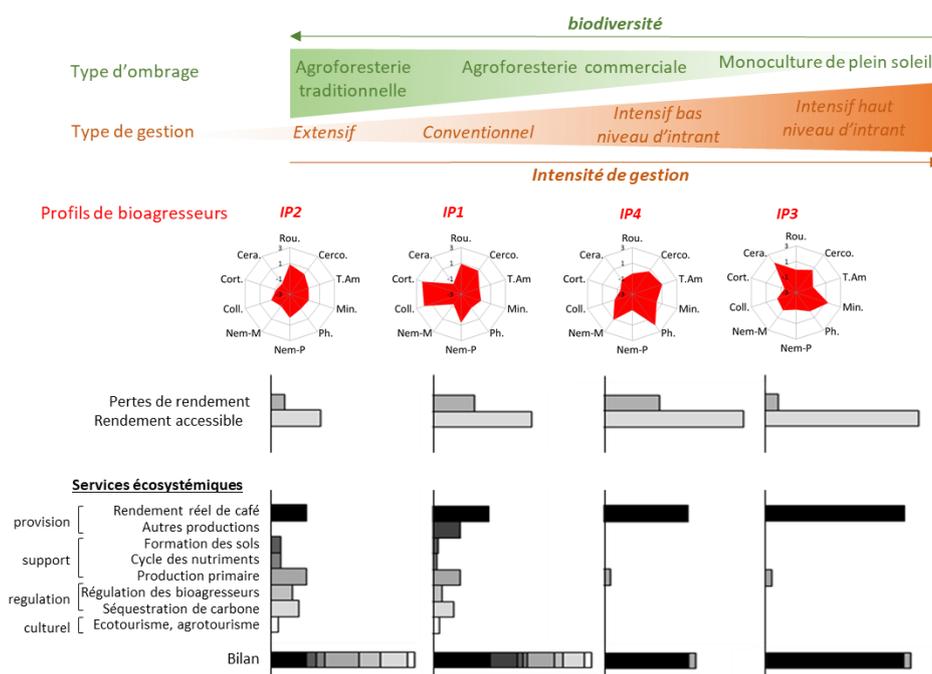
Pour cela, j'ai développé une approche « multipest », prenant en compte l'ensemble du complexe de M&R (Savary et al., 1995; Savary et al., 2006). Je me suis basée sur l'analyse de données d'enquêtes déjà existantes (collecté dans le cadre des travaux de Jacques Avelino), recueillies dans 107 parcelles de café, caractérisées chacune par un topo climat, un sol, des caractéristiques physiologiques de la plante en lien avec la productivité du café, des pratiques culturelles et un certain niveau d'incidence de M&R. Pour chacune de ces catégories de variables, nous avons réalisé une typologie des parcelles afin d'identifier des profils types, spécifiques des principaux attributs des systèmes de cultures. Les profils de dégâts ont été déterminés sur la base des niveaux d'incidence de sept maladies, un insecte et deux espèces de nématodes. Les groupes obtenus (types de topo climat, de sol, de caractéristiques physiologiques de production du café, de pratiques culturelles ainsi que les profils de dégâts), considérés alors comme des métavariabes, ont d'abord été décrits à partir des variables initiales. Puis nous avons réalisé une analyse des correspondances pour évaluer les niveaux d'associations entre les profils de dégâts et les autres métavariabes descriptives des agroécosystèmes. Nous avons également intégré dans l'analyse, comme variables supplémentaires, un indicateur du niveau de la biodiversité basée sur le type d'ombrage associé au système, et un indicateur du rendement accessible basé sur une estimation du rendement avant récolte.

Nous avons identifié quatre principaux types de systèmes de cultures représentatifs d'un gradient d'intensité de gestion (Figure 10). Le niveau de biodiversité associé aux types d'ombrage est apparu inversement proportionnel à ce gradient. À chacun de ces types de systèmes de cultures, allant de systèmes diversifiés à faible niveau d'intrants à des systèmes en monoculture avec une forte consommation d'intrants, sont associés des profils de dégâts spécifiques, et des niveaux de rendement différents. Les systèmes les plus diversifiés sont associés à de faibles rendements en café, mais associés à un profil de dégât ayant peu d'impact sur la production (IP2, Figure 10). À l'opposé les systèmes les plus intensifs, en monoculture, sont associés à des profils de M&R susceptibles de réduire fortement le rendement en café (IP3, Figure 10), qui reste malgré tout élevé, grâce à l'utilisation d'intrant chimiques. Ce résultat suggère, comme illustré dans la Figure 3 (section 2.1.1.4) que la biodiversité associée à l'IP2 pourrait soutenir le service de régulation des M&R, et ainsi maintenir les pertes de rendements à un niveau acceptable pour le producteur, tout en fournissant un bouquet d'autres SE. Mais cette hypothèse doit être vérifiée par la quantification réelle des SE, et des pertes de rendement dans un gradient de diversité, afin de fournir une base rationnelle pour les décisions des producteurs et de mieux déterminer la valeur des compromis entre SE.

De plus, nous avons mis en évidence que les caractéristiques environnementales physiques, topo climat et sol, étaient les principaux facteurs déterminant les profils de dégâts et les pertes de rendement associées. Les pratiques culturelles et la gestion des M&R doivent donc être d'abord adaptées à ces caractéristiques physiques. Nous avons montré que lorsque le topo climat et le sol favorisent le développement des M&R pouvant conduire à de lourdes pertes de rendement (IP1 et IP2, Figure 10), la diversification du système permet d'augmenter la fourniture de SE, comme la production d'autres cultures, notamment la banane, contribuant ainsi à compenser la baisse de rendement en café. Au contraire, lorsque les caractéristiques physiques de l'environnement ne sont pas favorables

aux M&R, il est possible d'augmenter la quantité d'arbres d'ombrage et donc le nombre de SE associés, à condition que cela ne réduise pas significativement la production de café.

Par la gestion des arbres d'ombrage (choix des espèces, taille et la couverture d'ombre résultante (ou pourcentage d'ombrage)), la densité de plantation ou la taille des caféiers (Rao et al., 1997), les producteurs peuvent ajuster les conditions microclimatiques à l'échelle de la parcelle (température, humidité relative, rayonnement solaire) et de l'humidité du sol (Brenda B, 2007) ce qui peut avoir un effet direct sur la régulation des M&R et réduire les pertes de rendement associées. Le type d'ombrage peut également réguler indirectement les M&R en augmentant les populations d'ennemis naturels (Karp et al., 2013). À l'échelle de la parcelle, les arbres d'ombrage peuvent également limiter la dispersion des M&R (Schroth et al., 2000). L'ensemble de ces connaissances montre qu'une compréhension systémique des relations entre l'ombrage, les M&R, et le rendement est nécessaire pour mieux évaluer le fonctionnement écologique sous-jacent de ces systèmes complexes.



**Figure 10 : Influence de la biodiversité, associée au système de culture et à son mode de gestion, sur les profils des M&R (IP1, IP2, IP3 et IP4) et la fourniture totale de services écosystémiques. Les M&R décrits sont : la rouille (Rou.), la cercosporiose (Cerco.), la maladie de la tache américaine (T.Am.), la mineuse des feuilles (Min.), le phoma (Ph.), les nématodes des lésions racinaires (Nem.P), les nématodes à galles (Nem.M), la mort régressive des rameaux (Coll.), la maladie de la toile d'araignée (Cort.) et le chancre du café (Cera.). Les valeurs présentées ont été centrées réduites. (issus de (Allinne et al., 2019) [L5])**

En résumé, cette étude a montré que selon le topoclimat, un producteur de café doit déterminer une combinaison appropriée de pratiques où les conditions microclimatiques et l'utilisation des ressources sont optimisées pour réduire l'impact du profil de dégât sur le rendement en café.

Ce travail m'a amené à réfléchir à la nécessité d'approfondir deux points : 1) mieux comprendre l'effet de l'ombrage sur le complexe de M&R, le rendement et leur interaction, et 2) quantifier les SE associés à un niveau d'arbre d'ombrage donné, dont le service de régulation à travers la mesure des pertes de rendements.

### 2.2.2. Prise en compte des effets antagonistes de l'ombrage au sein du complexe de M&R

J'ai cherché à comprendre quels étaient les effets de l'ombrage sur le complexe de M&R foliaire, sachant que l'ombrage peut avoir des effets favorables sur le développement d'une maladie tout en régulant une autre. Cette situation soulève la question de l'effet global de l'ombrage sur l'ensemble des M&R et de son impact sur le rendement en tenant compte de ces effets antagonistes.

Les études visant à établir l'effet de l'ombrage sur les différentes M&R ont montré que les conditions microclimatiques induites par la présence d'arbres d'ombrages contribuent à accroître le développement de certains M&R, telles que la maladie de la tache américaine (Avelino et al., 2007), ainsi que la pourriture du fil et la maladie rose (*Cortitium salmonicolor* Berk. & Br.) (Schroth et al., 2000). En revanche, l'ombrage réduit l'incidence de l'antracnose (Bedimo et al., 2008), du phoma (Muller et al., 2009) et de la cercosporiose (Schroth et al., 2000; Staver et al., 2001). Les effets de l'ombrage sur plusieurs autres M&R restent sujets à débat comme pour la mineuse des feuilles (Lomelí-Flores et al., 2010) et le scolyte des baies de café (Soto-Pinto et al., 2002; Staver et al., 2001). Cela est notamment dû aux effets complexes que peut avoir l'ombrage, par exemple des effets antagonistes au sein du cycle de développement du pathogène comme dans le cas de la rouille du café (Boudrot et al., 2016; Merle et al., 2020), ou des effets indirects favorisant d'autres voies d'actions de régulations, par exemple des mécanismes physiologiques (López-Bravo et al., 2012) ou la prolifération d'auxiliaires tels que *Beauveria Bassina* pour le scolyte des baies de café (Sanchez et al., 2013) et *Lecanicillium lecanii* pour la rouille du café (Jackson et al., 2012).

De plus, la présence d'arbre d'ombrage réduit la production de café : plus le niveau d'ombrage augmente, plus le rendement du café diminue (Campanha et al., 2004; Mokondoko et al., 2022; Soto-Pinto et al., 2000). En effet, l'ombrage a trois principaux effets sur le développement physiologique du caféier qui ont un impact sur le rendement (DaMatta, 2004; Damatta et al., 2007) : 1) la photosynthèse et l'assimilation nette de carbone à l'échelle de la plante sont réduites sous un ombrage excessif ; 2) l'ombrage stimule davantage les bourgeons végétatifs que les bourgeons floraux ; 3) l'ombrage réduit le nombre de nœuds fructifères formés par branche et le nombre de bourgeons floraux par nœud. Cependant, ces observations sont discutées lorsque le café est cultivé dans des conditions suboptimales (DaMatta, 2004; Muschler, 2016), et une étude a démontré que les arbres d'ombrage n'ont aucun effet sur le rendement, ni sur divers organes et indicateur de croissance et de réallocation de la biomasse (Charbonnier et al., 2017).

Puisque, selon la littérature, la présence d'arbre d'ombrage affecte à la fois le rendement du caféier et le complexe de M&R, j'ai voulu évaluer simultanément l'impact de l'ombrage sur ces deux composantes, de manière systémique. Pour cela, j'ai mis en place une expérimentation sur le site d'Aquières, à Turrialba au Costa-Rica, (dans le cadre de la plate-forme d'observation Coffee-Flux ce qui facilitait la mutualisation de données acquises) (Roupsard et al., 2015) basée sur un dispositif factoriel à trois facteurs : ombrage, âge et traitement pesticide. Quatre-vingts caféiers répartis en 4 classes d'âges, 2 conditions d'ombrage (ombre/soleil) et 2 traitements ont été étudiés. Le traitement mensuel par pesticides de la moitié des caféiers avait pour objectif d'obtenir un rendement accessible. Chaque mois, l'incidence (pourcentage de feuilles atteintes) et la sévérité (pourcentage de surface foliaire atteinte) de cinq champignons (rouille, tache américaine, cercosporiose, antracnose et phoma), ainsi que la mineuse des feuilles ont été mesurées sur 6 rameaux marqués par caféier. L'aire sous la courbe de progression de la maladie (AUDPC) a été calculée pour chaque année. Les rendements (poids sec des fruits) ont également été mesurés à la récolte. Le travail de saisie de données sur le terrain a été possible grâce à l'implication d'un étudiant de césure (Simon Vonthron), qui m'a aidé dans la mise au point du protocole, puis d'un technicien qui a collecté les mesures durant 3 ans (Alejandro Baquero).

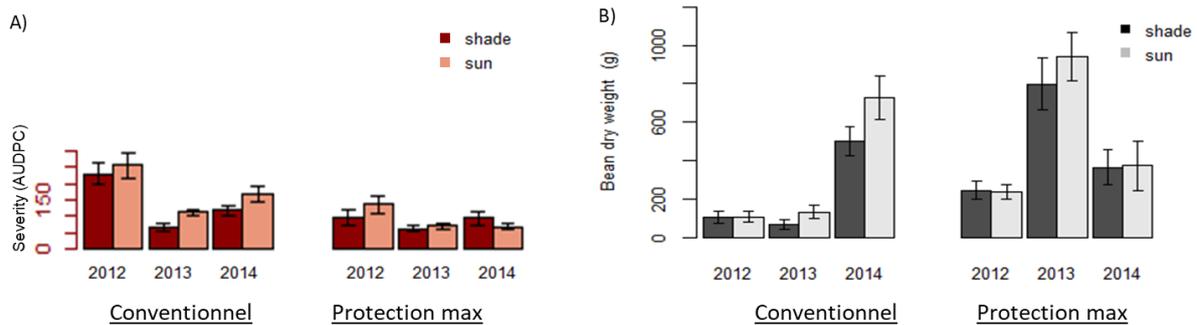


Figure 11 : Sévérité (A) exprimée en AUDPC par année pour l'ensemble du complexe de M&R et rendement (B) exprimé en poids sec des fruits, dans deux conditions d'ombrage : ombragées (Shade) et en plein soleil (Sun) ; et deux conditions de traitement chimiques : conventionnel et une protection maximum. Les effets de l'ombrage, du traitement chimique et leur interaction ont été testés par une ANOVA sur un modèle linéaire mixte.

Les résultats ont confirmé que chaque M&R répondait de manière distincte à la présence d'ombrage (réduction significative de la cercosporiose et du phoma, augmentation de la tache américaine, et pas d'effet sur la rouille et la mineuse des feuilles), et ont montré que l'incidence et la sévérité globale étaient significativement réduites sous ombrage (Figure 11).

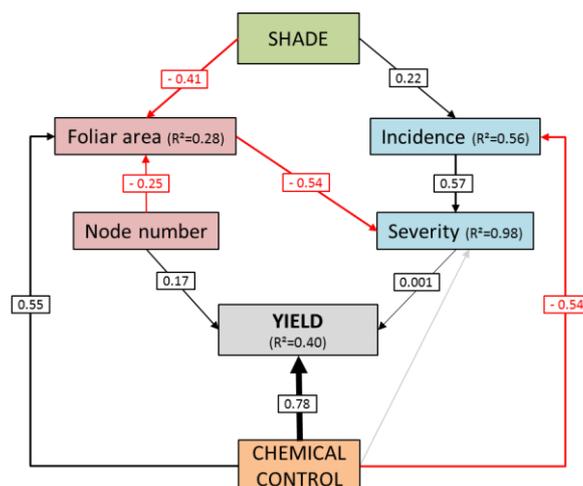


Figure 12 : Modèle d'équation structurelle explorant les relations entre l'ombrage, le traitement chimique, des indicateurs de croissance du caféier (surface foliaire et nombre de nœuds fructifère), l'incidence et la sévérité des M&R et le rendement. Les flèches représentent les relations unidirectionnelles entre les variables. Les flèches noires indiquent les relations positives et les flèches rouges les relations négatives. L'épaisseur des chemins significatifs a été mise à l'échelle en fonction de la valeur du coefficient de régression standardisé, indiqué dans la case correspondante. Les R<sup>2</sup> pour les composants des modèles sont indiqués dans les cases des variables de réponse. (C de Fisher =8,83 ; P-value= 0,842 ; AIC=62,83 ; K= 27)

La construction d'un modèle global d'équation structurelle explorant les relations entre l'ombrage, la lutte chimique, des indicateurs de croissance du caféier (surface foliaire et nombre de nœuds), l'incidence et la sévérité des M&R et le rendement du café, a permis d'établir que l'ombrage n'avait pas d'effet significatif sur le rendement, en raison de son effet sur la physiologie du café (Figure 12). Comme il a été montré précédemment, les conditions topoclimatiques sont un déterminant majeur du complexe de M&R, auquel est associé un niveau de perte. Nos résultats sont donc valables pour le complexe de M&R étudiés, et avec le niveau d'ombrage spécifique de la ferme d'Aquières. Il est

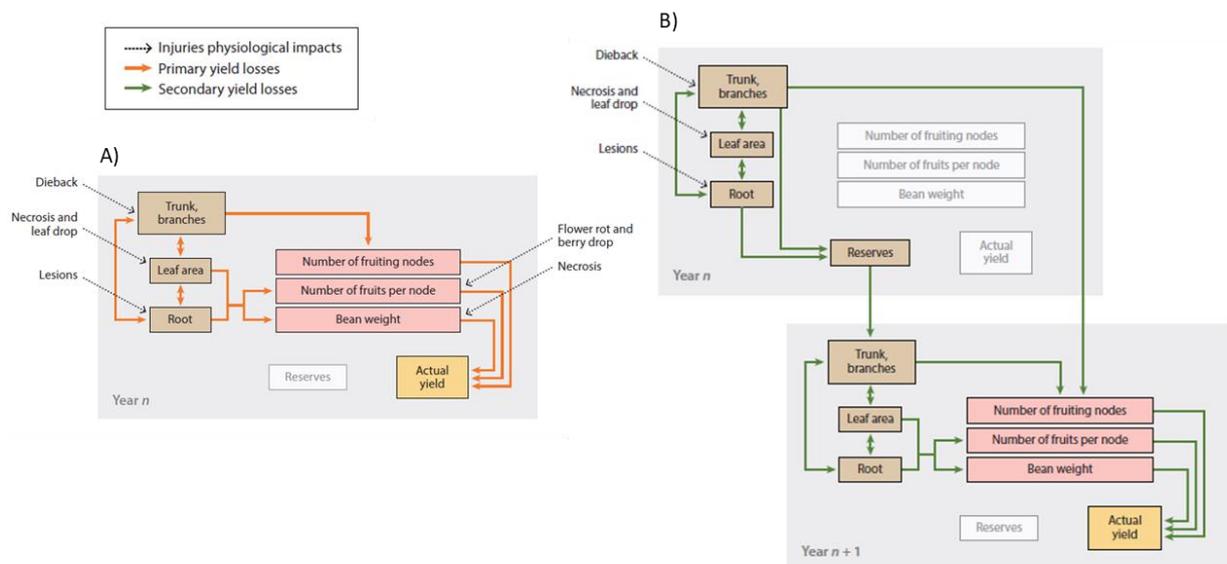
probable que 800 m plus hauts en altitude ou avec un ombrage plus fort nos résultats auraient été différents. Mais cette étude montre très clairement l'importance et la nécessité de considérer l'ensemble du pathosystème par une approche « multipest » lorsqu'on s'intéresse à l'impact des M&R sur le rendement.

Bien que la production de café soit généralement plus élevée en plein soleil, l'ombrage permet de maintenir un rendement acceptable, en particulier lors d'épidémies majeures de rouille, comme celles survenues en 2012. Cette épidémie a permis également de révéler que l'impact des M&R sur le rendement pouvait inverser la bisannualité de la production (Figure 11-B), en raison des effets de l'épidémie de l'année sur la production de l'année suivante. Notre protocole initialement prévu pour estimer les pertes de rendement (par comparaison entre un système conventionnel et une protection maximale), n'a pas fonctionné justement en raison de cette modification du cycle de production. Cela m'a alors conduit à conduire une réflexion méthodologique beaucoup plus poussée sur les méthodes de quantification des pertes de rendements chez le caféier.

### **2.2.3. Quantification et modélisation des pertes de rendement primaires et secondaires causées par M&R du caféier : mise au point d'outils méthodologiques**

La première étape a été de développer une méthodologie afin de disposer d'outils pour la quantification des pertes de rendement provoquées par les M&R, puis de mobiliser ces outils dans un gradient de situations de production afin d'évaluer l'effet de la diversification des arbres d'ombrages sur les pertes de rendements, mais aussi les pertes économiques. Pour cela j'ai initié une collaboration étroite avec un phytopathologiste spécialiste des M&R du caféier (Jacques Avelino), avec qui nous avons conduit une série d'expérimentations auxquelles se sont appuyés une thèse de doctorat (Rolando Cerda) et plusieurs stages d'étudiants de césure et M2 (Esther Lechevalier, Coralie Welsh Eugénie Clément).

Les pertes de rendements sont particulièrement difficiles à estimer quand il y a des pertes secondaires, c'est-à-dire des pertes causées par des dégâts d'une année donnée sur le rendement des années suivantes, comme c'est souvent le cas pour les cultures pérennes (Zadoks and Schein, 1979). Chez les plantes pérennes, les pertes de rendement dérivent souvent d'une perte de vigueur des plantes, liée, par exemple à une chute de feuilles prématurée. L'hypothèse qui est faite ici est que les répercussions de ces dégâts sur le rendement pourraient s'exprimer plusieurs années après leur apparition. Les pertes de rendement primaires sont la conséquence des effets directs des M&R sur le rendement, affectant les fleurs, les fruits et les graines du caféier, et des effets indirects, affectant les feuilles, les tiges et les racines (Figure 13). Comme les baies de café sont portées par le bois produit l'année précédente, tout dégât affectant la croissance des branches affecte également la production ultérieure (Figure 13).



**Figure 13 : Représentation conceptuelle des dommages physiologiques causés par les M&R sur le rendement du caféier au fil des années, ainsi que des voies d’actions qui sous-tendent les pertes de rendement (a) primaires et (b) secondaires. Chez le caféier, les composantes du rendement sont le nombre de nœuds fructifères par arbre, le nombre de fruits par nœud et le poids des grains. En réduisant la surface foliaire - via la nécrose et la chute des feuilles et la mort des branches (Dieback) - les dégâts causés par les M&R foliaires et les ravageurs modifient les relations source-puit et réduisent le nombre de fruits par nœud et le poids des grains. Ces deux composantes sont également directement affectées par la chute des fleurs et des fruits ainsi que la nécrose des baies. Les dégâts physiologiques affectent le rendement de l’année, entraînant des pertes de rendement primaires. La réduction de la surface foliaire et les branches mortes affectent le processus de translocation et limite la croissance des branches, réduisant le nombre de nœuds fructifères l’année suivante et induisant ainsi des pertes de rendement secondaires (Figure issue de Avelino et al, 2018 [AC13]).**

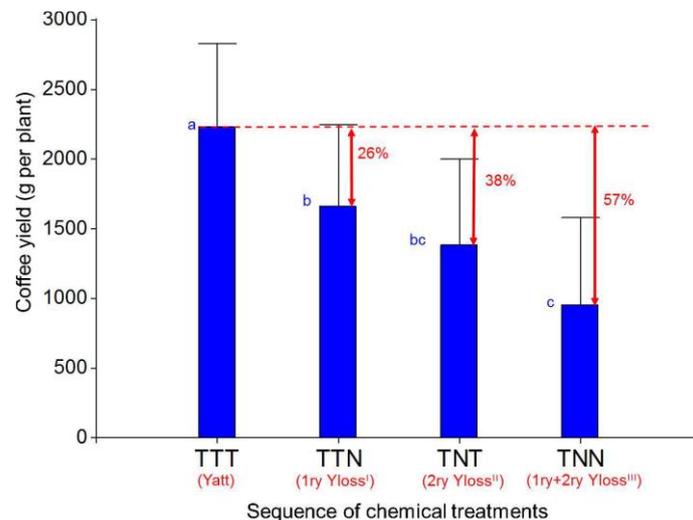
Sur la base de ce modèle conceptuel qui nous a permis d’identifier les variables clés à mesurer, nous avons mis en place un essai en station expérimentale de trois ans, en plein soleil, basé sur l’alternance de traitement chimique d’une année sur l’autre pour contrôler le cortège de M&R (affectant dans la zone d’étude principalement les parties aériennes du caféier): rouille, cercosporiose, anthracnose et mineuse des feuilles.

L’objectif était de lever deux verrous méthodologiques majeurs en s’appuyant sur le modèle café et son cortège de M&R: i) l’évaluation des pertes de rendement secondaires et leur prise en compte dans l’estimation des pertes de rendement totales et ii) l’estimation du rendement accessible, rendement de référence dans l’évaluation des pertes.

En évaluant la production obtenue avec ces différentes séquences, nous avons estimé le rendement accessible et les pertes de rendement, individuellement (perte primaire et perte secondaire) et conjointement (perte cumulée) (Figure 14). Les résultats obtenus ont montré que les pertes de rendement secondaires étaient plus importantes que les pertes de rendement primaires (38% contre 26%, par rapport au rendement accessible), et que les pertes de rendement cumulées peuvent entraîner la perte de plus de la moitié de la production (57% par rapport au rendement accessible).

Notre étude a confirmé que les M&R foliaires ont des impacts différés sur le café puisque la production dépend de la croissance des organes des années précédentes, ce qui explique en partie la bisannualité de la production observée chez le café (Damatta et al., 2007). Dans le cas des cultures annuelles, les pertes de rendement secondaires sont principalement liées à l’inoculum des pathogènes dans le sol ou aux graines infectées/infestées (Zadoks and Schein, 1979). Cependant, les pratiques de gestion des cultures annuelles permettent de limiter ces pertes secondaires par la sélection ou l’achat de semences

saines, la rotation des cultures, ou même par la désinfection du sol avant le semis. En revanche, dans les cultures pérennes, les pertes de rendement secondaires résultant des dégâts de l'année précédente ne peuvent être évitées. Des pertes sur plusieurs années consécutives sont même attendues, ce qui ne peut être réduit que par la mise en œuvre de pratiques appropriées pour favoriser la croissance des plantes et gérer l'impact des pertes secondaires (taille sélective).

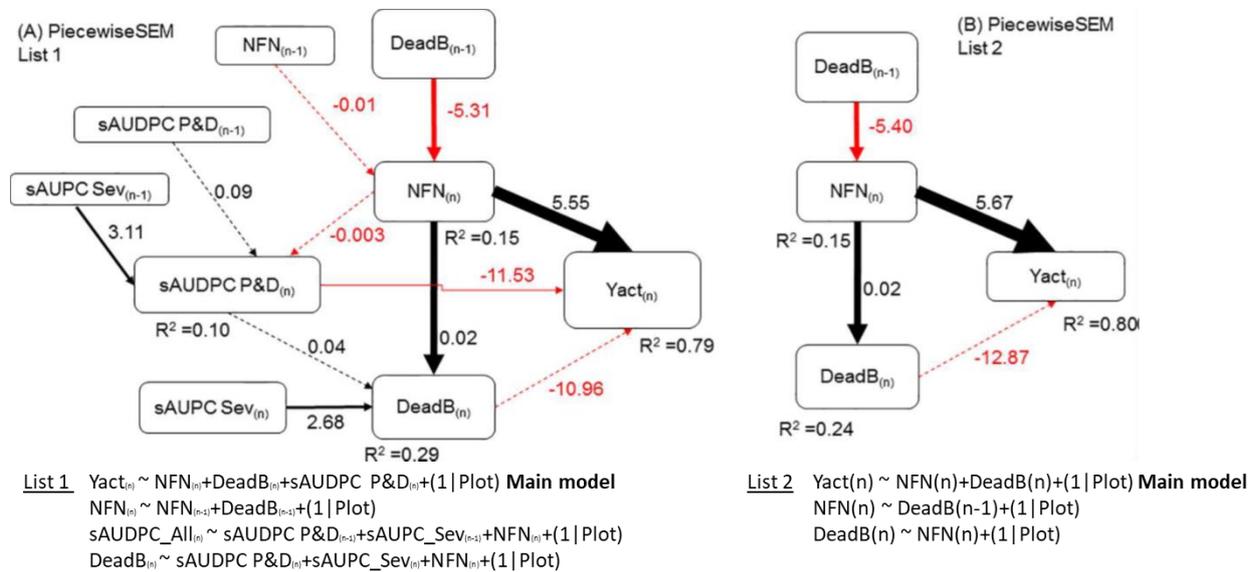


**Figure 14 : Rendements et pertes de rendement primaires et secondaires résultant des séquences de traitements chimiques TTT, TTN, TNT, TNN. T : traité avec des pesticides ; N : pas de contrôle des M&R.(Figure X) Les différences significatives ( $P < 0,05$ ) entre les rendements du café sont indiquées par les lettres minuscules. Les flèches rouges et les nombres en pourcentage représentent les pertes de rendement. Yatt : rendement accessible ; Yloss : perte de rendement du café ; I : pertes primaires résultant des dégâts de l'année en cours (année n) ; II : pertes secondaires résultant des dégâts de l'année n-1 ; III : pertes primaires et secondaires (pertes totales) résultant des dégâts des années n et n-1. (Figure issue de Cerda et al, 2017).**

Nos résultats ont permis notamment d'expliquer ce qui a été observé lors de la crise du café en Amérique centrale à partir de 2012 suite à l'effet combiné d'une épidémie de rouille sévère et d'une gestion inefficace des plantations de café, quant à la dynamique de réduction de la productivité (Avelino et al., 2015). À partir de 2012, la production a diminué pendant deux années consécutives dans la plupart des pays. L'analyse de l'évolution de la production de café de l'année précédant la crise a permis de déduire que la production totale en Amérique centrale pour la récolte 2012-2013 a diminué d'environ 10% par rapport à 2011-2012, ce qui pourrait être attribué en partie aux pertes primaires résultant des premiers impacts de la maladie. Mais, les impacts les plus graves (défoliation et/ou mort de branches ou de plants) ont été observés lors de la récolte 2013-2014, avec une réduction de 20% par rapport à 2011-2012, reflétant la gravité des pertes secondaires. La production a commencé à se rétablir lors des récoltes 2014-2015 et 2015-2016, en partie grâce aux mesures de contrôle mises en place aux niveaux national et régional, ainsi qu'aux opérations de taille (élagage radical) réalisées par les agriculteurs en 2013, la production se rétablissant deux ou trois ans plus tard (Avelino et al., 2015).

Notre approche de modélisation statistique nous a permis d'élaborer un modèle simple pour la prédiction du rendement réel basé sur la mesure de variables faciles à mesurer (Figure 15). Elle a également permis d'identifier le nombre de branches productives mortes comme prédicteur de l'impact des M&R sur le rendement. En effet, nous avons montré que le nombre de branches productives mortes d'une année est le principal facteur de réduction du nombre de nœuds fructifères

de l'année suivante, et donc du rendement (Figure 15). Ce résultat a des implications pour la gestion de l'architecture des caféiers : dans les zones soumises à la pression forte de M&R foliaires, il serait préférable de favoriser des architectures avec un nombre élevé de branches productives avec peu de nœuds fructifères par branche, plutôt que peu de branches productives avec de nombreux nœuds fructifères par branche. De cette manière, le risque de pertes dues à la mort des branches serait réduit.



**Figure 15 : Modèle d'équations structurelles pour l'estimation du rendement réel du caféier pour deux modèles : List 1 (A) et List 2 (B). Yact : rendement réel du café par plante ; NFN : nombre de nœuds fructifères par plante ; DeadB : nombre de branches productives mortes par plante ; sAUDPC P&D : aire sous la courbe de progression du cortège de M&R, standardisé ; sAUPC Sev : aire sous la courbe de progression de la sévérité, standardisée ; (n) : année en cours (2015) ; (n-1) : année précédente (2014). Les flèches représentent les relations entre les variables ; noires : relations positives ; rouges : relations négatives ; en pointillés : voies d'action non significatives ( $P > 0,05$ ) ; en trait continu : voies d'action significatives ( $P < 0,05$ ). La valeur des coefficients de régression est indiquée à côté de chaque flèche correspondante. L'épaisseur des flèches a été ajustée par rapport à la valeur des coefficients de régression standardisés (non indiqués dans les figures). (Figure adaptée de Cerda et al, 2017 [ACL9]).**

Enfin, ce type de variables intégratives et représentatives de liens mécanistes existants entre les variables physiologiques sont donc intéressantes à rechercher et à intégrer dans les modèles d'estimation des pertes de rendement afin d'améliorer leur qualité prédictive, tout en disposant d'un indicateur facilement mesurable (Cooke, 2006; Savary et al., 2006).

La modélisation a également souligné l'importance de la prise en compte du complexe de M&R par rapport à une analyse classique considérant les M&R individuellement. En effet les résultats ont révélé que l'impact des M&R considéré séparément n'était pas significatif pour l'estimation du rendement. Seul le sAUDPC (Surface Area Under the Disease Progress Curve) de l'ensemble des M&R, ainsi que leur sévérité globale, s'ajustaient bien dans le modèle PiecewiseSEM. Ce résultat confirme la pertinence de l'évaluation des profils de dégâts.

Notre approche systémique et expérimentale s'est avérée utile pour surmonter les difficultés liées à la quantification des pertes de rendement. La plupart des tentatives d'évaluation des pertes de rendement reposaient sur des relations statistiques entre les rendements et les descripteurs spécifiques des M&R dans des modèles empiriques. Cependant, ces relations peuvent être masquées

ou affaiblies par plusieurs facteurs confondants tels que les interactions au sein du complexe de M&R, les interactions entre les M&R et d'autres facteurs qui influent sur la production [4, 34].

#### **2.2.4. Effet de la diversification sur les pertes de rendement et les pertes économiques**

Une fois les outils à disposition pour évaluer les pertes de rendement en caféiers, il a été possible de quantifier ces pertes dans un gradient de diversité de SAFs, et d'y intégrer le facteur économique, crucial dans une logique de co-conception avec les agriculteurs. Dans le cadre de la thèse de Rolando Cerda, et avec l'appui de plusieurs étudiants de Master (Eugénie Clément, Louise Krolczyk, Charlie Mathiot) et d'une équipe de 2 techniciens de terrain, nous avons établi un réseau de 69 parcelles caféières cultivées de manière conventionnelle dans la région de Turrialba, au Costa Rica, qui a été suivi deux années consécutives (2014-2015). Les parcelles ont été sélectionnées en fonction de la combinaison de trois facteurs : i) l'altitude : basse (<850 m d'altitude) et élevée (>850 m d'altitude) ; ii) le type d'ombrage : café en plein soleil, ombrage simple (dominé par *Erythrina poeppigiana*) et ombrage diversifié (musacées, arbres de service, arbres fruitiers et arbres de bois) ; iii) Gestion : faible (peu de pratiques culturales et faibles intrants) et élevée (nombreuses pratiques culturales et intrants élevés). Nous avons mesuré la sévérité du complexe de M&R et compté le nombre de branches mortes. Nous avons également évalué l'impact de la gestion du système sur le contrôle des M&R en estimant par modélisation les pertes de rendement. Les rendements, les coûts de gestion et les revenus des produits agroforestiers ont été utilisés pour calculer des indicateurs économiques et évaluer leur contribution globale aux exploitations (Cerda et al., 2016; Cerda et al., 2015b).

En agriculture conventionnelle, la diversification du système, en interaction avec le niveau d'intensité de gestion, impact significativement le rendement à travers des effets sur le complexe de M&R, le rendement accessible et l'impact des M&R sur ce dernier, c'est-à-dire sur le rendement réel.

Dans les systèmes gérés de façon intensive, la diversification du système par l'introduction d'arbres d'ombrage permet de réduire la sévérité globale des M&R et le nombre de branches mortes ainsi que les pertes de rendements (Figure 16-A et B), sans réduire significativement les rendements accessibles et réels. Ce résultat renforce l'idée que la diversification des systèmes peut contribuer à réguler les M&R. De plus, bien que les revenus bruts soient identiques entre les trois types de systèmes, la diversification permet de réduire les coûts de production et d'augmenter les flux de trésorerie, et ainsi d'augmenter les bénéfices (Figure 16-E, F, G et H). La monoculture intensive de café, qui vise des rendements accessibles élevés par des pratiques de gestions souvent coûteuses (fertilisants, tailles, désherbage chimique ou manuel), favorise des profils de dégâts pouvant entraîner de lourdes pertes, qui sont alors limitées par l'utilisation de pesticides chimiques. Cette stratégie de gestion n'est donc pas toujours la meilleure option pour les exploitations agricoles. Les coûts financiers du café en plein soleil sont plus élevés, ce qui entraîne un flux de trésorerie inférieur par rapport aux SAFs. De plus, les produits secondaires issus des arbres constituant la strate arborée permettent également d'augmenter la trésorerie et l'auto-consommation.

Ces résultats montrent également que la diversification des systèmes permet d'améliorer la résilience écologique et économique dans le cas où les systèmes sont faiblement gérés. En effet, les systèmes en plein soleil faiblement gérés présentent le rendement accessible le plus faible, les pertes les plus élevées et par conséquent le rendement réel le plus bas (Figure 16-B, CD) : ce sont clairement les systèmes les moins rentables. Alors que les systèmes diversifiés faiblement gérés génèrent au final, des bénéfices comparables à ceux de la monoculture intensive (Figure 16-H). Le rendement en café y est moyen malgré des pertes élevées, mais la rentabilité vient du très faible coût d'investissement (en

intrants et temps de travail) par rapport à ce que rapportent les productions de café et autres ressources commercialisables. Cette interaction notable entre l'intensité de gestion et le niveau de diversification d'ombrage ont été explorées davantage dans le papier Cerda et al, 2017 (Cerda et al., 2017).

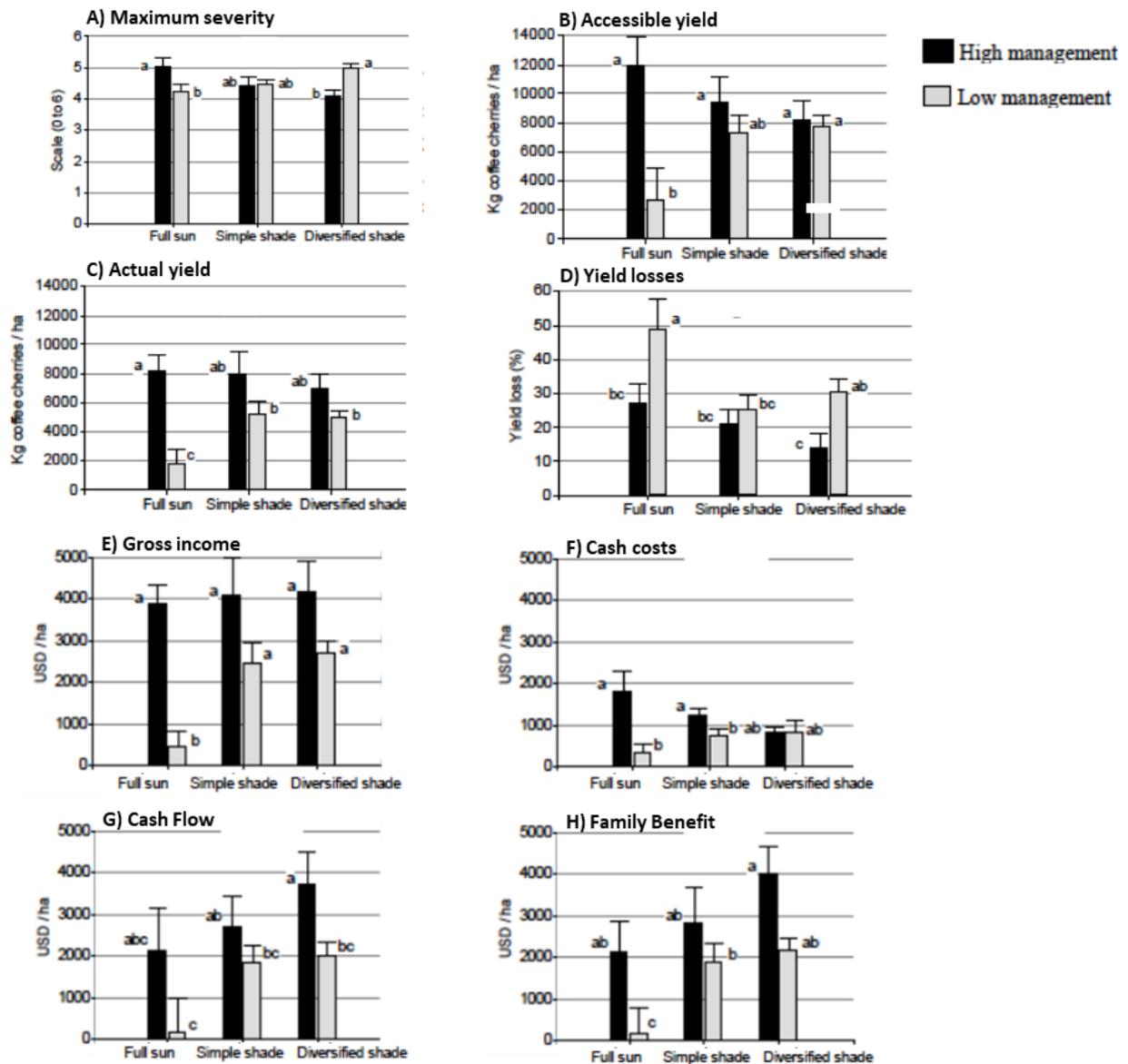
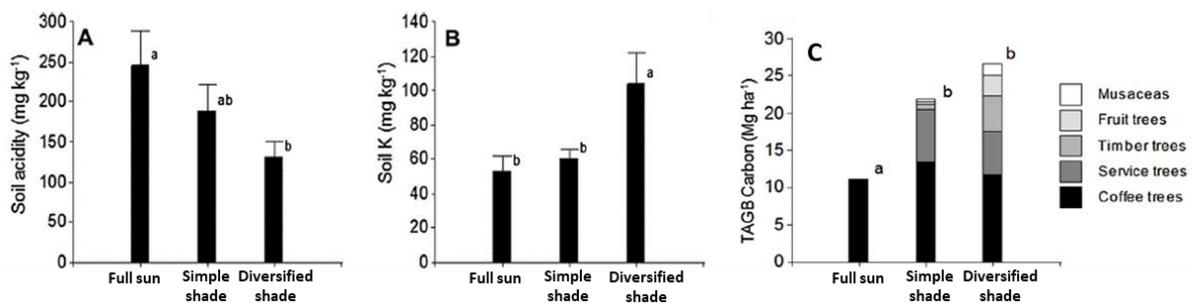


Figure 16 : Effet du type d'ombrage (plein soleil, ombrage simple et ombrage diversifié) et de l'intensité de gestions (gestion intensive ou faible niveau de gestion) sur la sévérité maximale du complexe de M&E (A), le rendement accessible (B), le rendement réel (C), les pertes de rendements (D), le revenu brut (E), les coûts de trésorerie (F), les flux de trésorerie (G) et les bénéfices (H). Différentes minuscules indiquent une différence significative entre les moyennes à  $p < 0,05$  sur la base d'analyses de variance utilisant des modèles linéaires mixtes généralisés et le test LSD (Fisher). (d'après(Cerda et al., 2015a)[C16]

## 2.2.5. Effet de la diversification et de l'intensité de gestion sur la production de SE

Afin d'intégrer la dimension de durabilité écologique à l'évaluation des systèmes diversifiés, dans le même réseau de parcelles, nous avons quantifié différents SE à travers la mesure d'indicateurs : la fertilité des sols (mesures physico-chimiques du sol), la séquestration de carbone (utilisation d'équations allométriques), la biodiversité (indice de diversité), la régulation des M&R (pertes de rendement), et la production (rendement). Nous avons ainsi pu montrer que les SAFs les plus diversifiés présentaient des sols de meilleure qualité. En effet le type d'ombrage a un effet simple sur l'acidité et le K du sol (Figure 17-A), et 17-B)) : les SAFs permettent de limiter l'augmentation de l'acidité des sols observés en monoculture particulièrement dans les systèmes intensifs. Nous avons observé un triple effet d'interaction entre l'altitude, le type d'ombrage et l'intensité de gestion sur le C et le N du sol. Les SAFs les plus diversifiés ont également plus de carbone dans le sol. De plus le stock de carbone dans les systèmes les diversifiés et en moyenne 2 fois supérieures à celui observé en monoculture en raison de la contribution des arbres fruitiers, des arbres à bois et des arbres de service (Figure 17-C)).

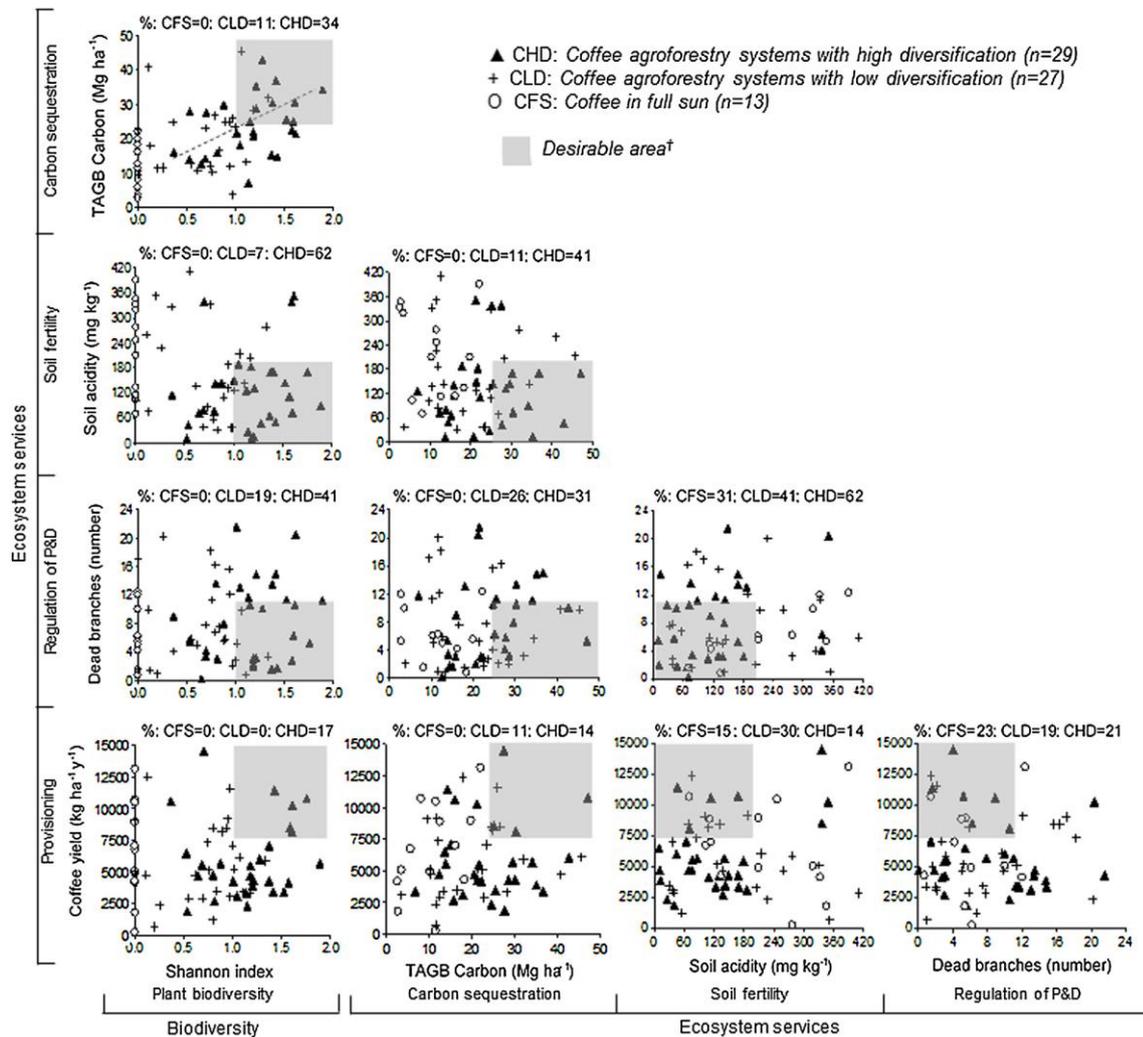


**Figure 17 : Effet du type d'ombrage (plein soleil, ombrage simple et ombrage diversifié) sur l'acidité du sol (A), la teneur en potassium (B) et sur le carbone total de la biomasse aérienne (C). Différentes minuscules indiquent une différence significative entre les moyennes à  $p < 0,05$  sur la base d'analyses de variance utilisant des modèles linéaires mixtes généralisés et le test LSD (Fisher). (d'après Cerda et al., 2017 (Cerda et al., 2017))**

La biodiversité étant le support des SE, nous avons cherché à établir cette relation, et avons également recherché l'existence de compromis entre les SE mesurés. Nous n'avons observé aucune relation significative, ni entre la biodiversité et les différents SE, ni entre les SE entre eux (Figure 18). La seule synergie que nous avons mise en évidence est celle entre biodiversité et séquestration du carbone (Figure 18).

Aucun des compromis rapportés dans la littérature scientifique sur les SAFs, tels que ceux entre rendement et biodiversité (Tschardt et al., 2011), rendement et séquestration du carbone (Wade et al., 2010), rendement et régulation des M&R (López-Bravo et al., 2012), n'a pu être mis en évidence. Et l'absence de compromis entre les SE étudiés est un résultat nouveau, qui peut s'expliquer par le fait que la fourniture de SE est le résultat de l'interaction entre la composition et la gestion du système (Rapidel et al., 2015). Ainsi, les systèmes les plus diversifiés sont capables de produire des niveaux élevés de SE sans compromis avec une gestion appropriée. Il a d'ailleurs été montré que la gestion du système peut influencer considérablement la pollinisation et la production du café (Boreux et al., 2013), la fourniture d'autres produits forestiers (Ango et al., 2014), la régulation des M&R (Avelino et al., 2006), la fertilité du sol (Sauvadet et al., 2018) et la séquestration du carbone (Häger, 2012). Dans notre zone d'étude, à Turrialba, il existe de nombreuses combinaisons de types d'ombrage et de pratiques culturales, avec des réponses variables en termes de fourniture de SE. Certaines parcelles de

café présentent des valeurs faibles pour un SE donné, tandis que d'autres parcelles de café avec le même type d'ombrage présentent des valeurs élevées pour le même SE ; c'est pourquoi aucun compromis entre les SE n'a été trouvé.



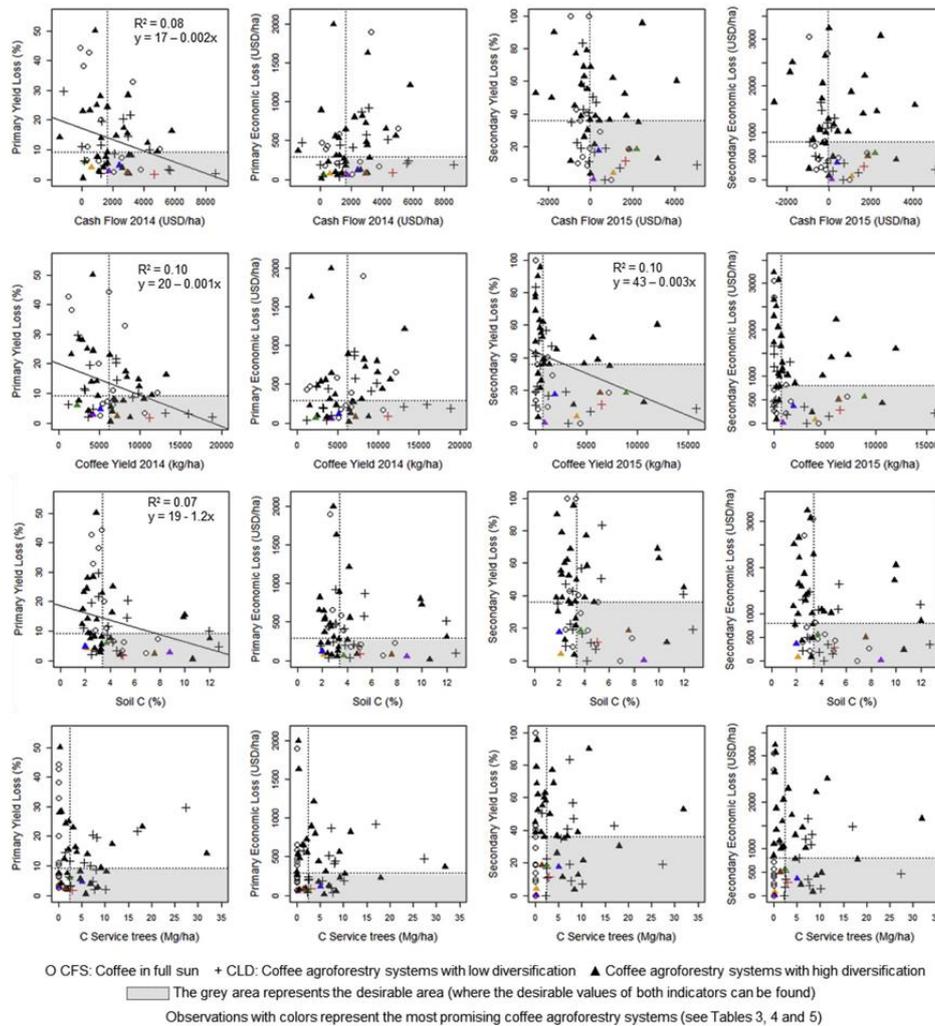
**Figure 18 : Relations entre les services écosystémiques et la biodiversité dans un réseau de parcelles caféières représentant trois niveaux de diversification des systèmes (ou type d'ombrage) : plein soleil (CFS), faible diversification (CLD) et forte diversification (CHD); dans l'air des solutions possibles et désirables (carré gris), le pourcentage de différents types d'ombrage a été calculé. (Issus de (Cerdea et al., 2017) [ACL10])**

Le fait que nous n'avons trouvé aucune relation entre les différents SE étudiés, compromis ou synergies, permet de chercher des situations dans lesquelles deux SE présentes des valeurs élevées et attendues. Nous avons appelé cette zone, l'air des solutions possibles et désirables (Figure 18), et pour chaque combinaison de SE, elle est constituée principalement des systèmes les plus diversifiés. Cela indique que l'utilisation d'arbres d'ombrage est essentielle pour fournir simultanément plusieurs SE.

### 2.2.6. Transition des systèmes conventionnels vers des systèmes plus durables

Sur la base des résultats précédemment acquis, nous avons fait l'hypothèse qu'il existait dans la région de Turrialba des systèmes présentant une combinaison de caractéristiques qui leur conféraient une plus grande durabilité que la moyenne des systèmes étudiés, et qu'il était possible de s'inspirer de ces systèmes pour proposer des voies de transition afin d'améliorer la durabilité des systèmes de cultures à base de caféiers. Nous avons ainsi cherché à identifier les SAFs les plus prometteurs à la fois pour

réduire l'impact des M&R et pour garantir la fourniture SE dans le réseau de 61 parcelles précédemment décrit. Nous avons quantifié les pertes primaires et secondaires de café (pertes de rendement et économiques) et les indicateurs de trois autres SE : la fourniture de produits agroforestiers (bananes, plantains, autres fruits et bois), le maintien de la fertilité du sol et la séquestration du carbone. Nous avons ensuite mis en relation les pertes et l'ensemble des indicateurs de SE et identifié dans chacune des corrélations l'aire des solutions possibles et désirables (carré gris) (Figure 19).



**Figure 19 : Relations entre les indicateurs de pertes (pertes de rendement et pertes économiques primaires et secondaires) et les indicateurs de rentabilité économiques (cash-flow), et de production de services écosystémiques (rendement en café (coffee yield) ; séquestration du carbone pour les arbres de services ( C service trees) ; fertilité du sol (soil C)). L'air des solutions possibles et désirables des systèmes présentant les meilleures combinaisons recherchées est représenté par le carré gris. Les 6 systèmes atteignant les niveaux les plus souhaitables de SE sont indiqué en couleur. (Issus de (Cerde et al., 2020)[ACL16])**

Ainsi, nous avons identifié les systèmes qui présentaient les plus faibles pertes dues aux M&R et qui fournissaient des niveaux souhaitables de produits agroforestiers, de fertilité du sol et de séquestration du carbone. Nous avons trouvé de multiples relations significatives entre les pertes et les SE (comprenant à la fois des compromis et des synergies) qui nous ont permis de formuler des recommandations pour de meilleures stratégies de gestion afin de réduire les pertes de rendement.

Nous avons identifié six SAFs comme les plus prometteurs pour réduire les pertes tout en fournissant simultanément d'autres SE (en couleur dans la Figure 19 et illustré dans le Figure 20). L'un de ces SAFs était un système simple (dominé par les arbres de service), trois étaient des SAFs moyennement diversifiés et deux étaient des SAFs hautement diversifiés (systèmes comprenant des arbres de service, des arbres à bois, des arbres fruitiers et des musacées). Les six SAFs différaient dans leurs pratiques culturales et leurs objectifs de rentabilité pour les agriculteurs. Les six SAFs offrent plusieurs options pour la conception de nouveau SAF à base de caféiers, ou pour la transformation des systèmes existants. Plusieurs de ces SAFs prometteurs utilisent peu de fongicides, ce qui indique que la réduction des intrants chimiques est possible. Nos résultats suggèrent que la régulation des M&R et des pertes associées dans les SAFs doit reposer sur les effets positifs de la biodiversité végétale, assurant aux systèmes ombrage, fertilité du sol et permettant une utilisation minimale de fongicides.

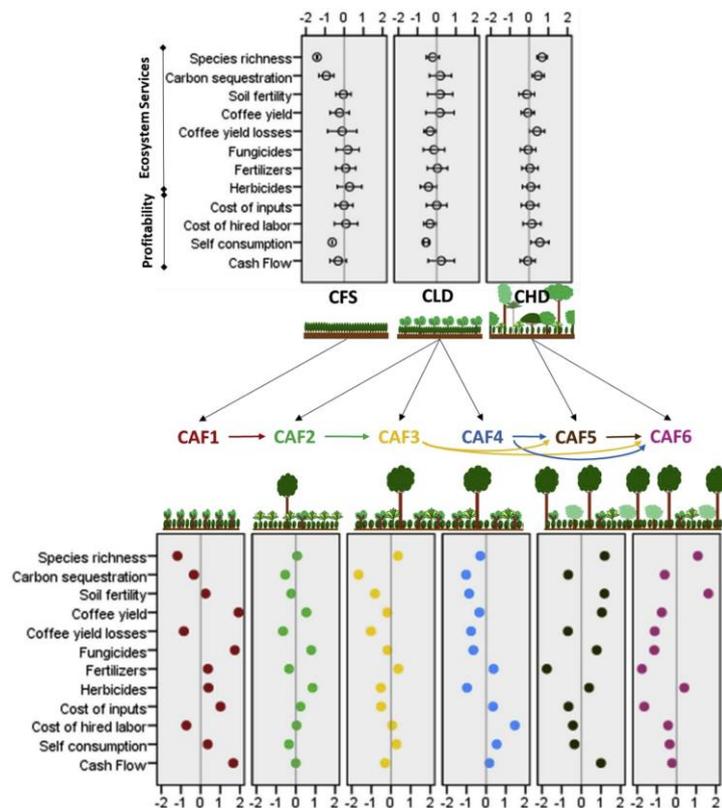


Figure 20 : A) Services écosystémiques et rentabilité économique pour trois niveaux de diversification des systèmes (ou type d'ombrage) : plein soleil (CFS), faible diversification (CLD) et forte diversification (CHD), B) identification des six systèmes les plus prometteurs (CAF1 à CAF6) et des possibles voies de transition pour passer des systèmes classiques (CFS, CLD, CHD) vers ces systèmes les plus prometteurs sont indiquées par des flèches noires. Les voies pour passer du système de culture peu durable au système de culture plus durable (en termes d'utilisation de pesticides) sont indiquées par des flèches colorées. (issus de Cerda et al ; 2020, [ACL16])

### 2.2.7. Conclusion : de l'évaluation des pertes de rendement à la conception de systèmes durables

L'évaluation des pertes de rendement causées par un complexe de M&R constitue une étape cruciale pour la conception de SAFs à base de caféiers durables. La compréhension des facteurs sous-jacents au développement des M&R et aux pertes de rendement associées permet d'identifier les leviers pour une gestion des M&R prenant en compte les interactions entre les composants biophysiques du système, notamment à travers la gestion des arbres d'ombrages.

Dans le cas des cultures pérennes, l'évaluation des pertes de récolte dues aux M&R est particulièrement difficile, car les dégâts peuvent affecter le rendement sur plusieurs années. Ces travaux sur le caféier constituent les premiers où des pertes de rendements primaires et secondaires ont été quantifiées chez une culture pérenne.

Une autre difficulté est l'intégration du complexe de M&R, où chaque M&R a son propre mécanisme de dégât et surtout des conditions de développements optimums spécifiques. Cela implique, dans un SAFs complexe, d'être capable de prendre en compte la résultante de ces effets combinés sur le rendement.

J'ai mobilisé différentes approches pour évaluer ces pertes de rendements : des essais sur le terrain et des enquêtes, mais également la mesure d'indicateurs de réduction du rendement tel que le nombre de branches productives mortes, et par modélisation, où les mécanismes de dégâts pour chaque profil de dégâts sont pris en compte sur plusieurs années. Je dispose maintenant d'une « boîte à outils » dans laquelle je peux piocher selon le besoin, l'une ou l'autre des méthodologies construites. C'est ce que j'ai fait par la suite dans les travaux que j'ai menés au Nicaragua et à Haïti, où j'ai mobilisé ces outils, pour le diagnostic et l'évaluation de systèmes, dans une démarche de co-conception et de recherche participative (que je n'ai pas présenté dans mon bilan), et également pour approfondir la compréhension des processus impliqués dans la régulation des M&R au sein de SAFS complexe.

## 2.3. GESTION DE LA BIODIVERSITE POUR LA REGULATION DES M&R DANS DES SYSTEMES BIOLOGIQUES

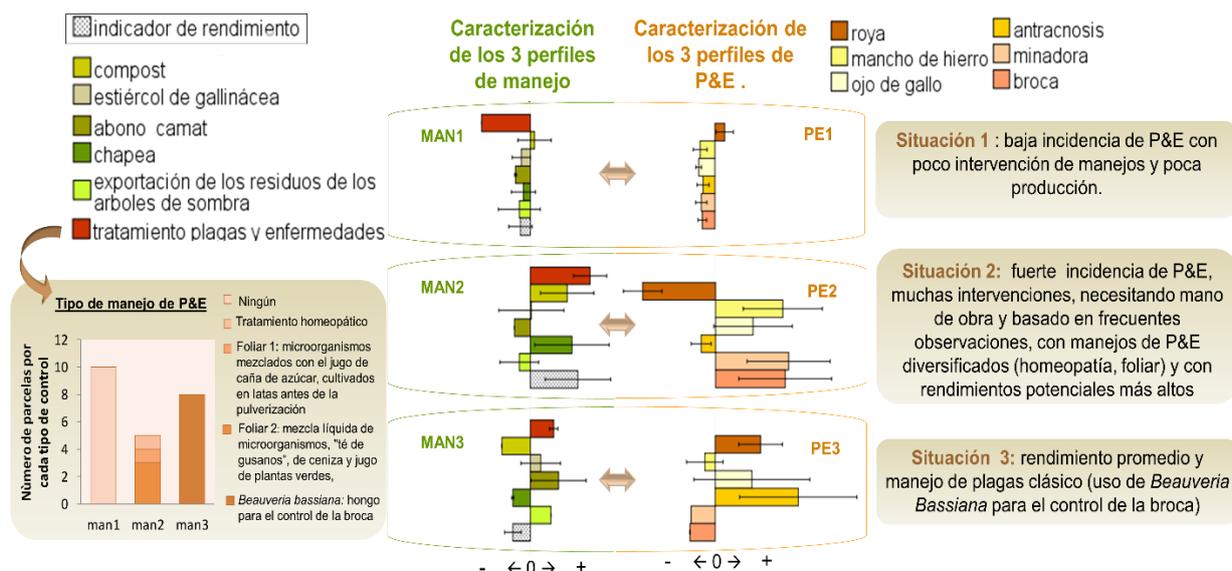
En parallèle des travaux menés sur l'effet de la diversification par l'introduction d'arbres d'ombrage dans les systèmes conventionnels, dans une logique de réduction de pesticides, j'ai cherché à comprendre quelles pratiques alternatives à l'usage de pesticides, fortement recommandés au Costa-Rica étaient possible. J'ai alors décidé d'explorer les pratiques de gestion des M&R dans les systèmes biologiques d'abord au Costa-Rica pour comprendre leur impact sur la régulation des M&R. Puis je me suis intéressée aux voies d'actions qui sous-tendent la régulation des M&R par le système dans Nicaragua et à Haïti, où les SAFs à base de caféiers sont beaucoup plus diversifiés et souvent bio « par dépit (en raison du prix inabordable des intrants chimiques pour les producteurs). Je me suis appuyé sur les résultats obtenus précédemment l'analyse des pertes et l'identification d'indicateurs pour évaluer l'impact des M&R sur le rendement, j'ai cherché à comprendre comment la biodiversité associée (arbres d'ombrage) sous-tend les voies de régulations des M&R au sein du système. En explorant les systèmes biologiques, j'ai fait l'hypothèse que l'absence de pesticides permettait d'étudier le service de régulation et les voies d'actions qui lui sont associées.

### 2.3.1. Effet de la situation de production et des pratiques sur le complexe de M&R et le rendement

Au Costa Rica, la production de café biologique représente moins de 2% de la production totale, mais j'ai supposé qu'au sein de la diversité de ces systèmes biologiques, il existe des situations où l'impact des M&R sur la production est suffisamment faible pour garantir la viabilité économique pour le producteur, et de trouver des méthodes de lutte contre les M&R efficaces et durables.

J'ai alors monté un sujet de stage avec Bénédicte Autret, une étudiante en stage de M1, dont l'objectif était de i) caractériser les pratiques et le niveau d'incidence du pathosystème dans les systèmes biologiques, et ii) identifier des modèles de gestion durable permettant de réduire l'impact des M&R. Nous avons mené 17 entretiens semi-structurés avec des producteurs biologiques de la région de Turrialba. Nous nous sommes concentrés sur la caractérisation des méthodes de lutte contre M&R, de la fertilisation, de la gestion de l'ombre et du type de taille des caféiers. De plus, dans 23 parcelles, nous avons mesuré l'incidence des M&R ainsi qu'un indicateur de rendement (nombre de nœuds fructifères par caféier x densité caféiers). Les données ont été analysées par des méthodes multivariées (classification hiérarchique pour établir une typologie i) des pratiques et ii) des profils de ravageurs et de maladies (pathosystème) ; test de Mantel pour établir la relation entre les deux types de profils ; analyse des correspondances pour représenter les associations entre les groupes de la typologie).

Les résultats ont permis d'identifier trois types de situations (Figure 21). La première (Situación 1), qui représente la majorité des exploitations, se caractérise par une faible incidence des M&R, associée à peu d'intervention technique et une faible production. La deuxième (Situación 2) présente une forte incidence de M&R, des pratiques de gestion intensives en main-d'œuvre et basées sur des observations fréquentes, avec des méthodes de lutte contre les M&R diversifiées (homéopathie, foliaire) et des rendements accessibles plus élevés que les deux autres types. La troisième situation (Situación 3) est intermédiaire entre les deux autres, avec un rendement accessible moyen et une gestion classique des ravageurs (utilisation de *Beauveria Bassiana* pour le contrôle du scolyte).



**Figure 21 : Associations entre les profils de pratiques de gestion et les profils de M&R. Les barres représentent les écarts à la moyenne des valeurs centrées réduites de chaque variable. Les barres d'erreur représentent l'écart-type. (Issus de (Autret et al., 2013) [C5])**

Ce travail montre que dans les systèmes de café biologiques, il existe des situations de rendement élevé malgré une forte incidence de M&R. Il existe des pratiques permettant de réduire l'impact des M&R sur le rendement sans recourir à des pesticides chimiques. L'étape suivante a été d'étudier plus en détail ces pratiques pour mesurer leur efficacité et étudier leur possibilité d'application dans les systèmes biologiques et conventionnels. Cela a donné suite à une série de plusieurs enquêtes menées par des étudiants ou jeunes ingénieurs que j'ai supervisés (Hugo Ferrari, Philippe Ninin et Jeremy Griscelli), et également au montage d'un projet avec une association de producteurs bio pour évaluer l'efficacité des bioferments qu'il fabriquait. Ces travaux allant de la traque à l'innovation au diagnostic agronomique m'ont permis de disposer d'une cartographie des systèmes innovants en terme de gestion des M&R dans la région. Je n'ai pas donné suite à ce travail exploratoire en raison de mon départ du Costa-Rica en 2020.

Cela montre aussi qu'en l'absence d'intervention technique (situation 1), l'incidence des M&R reste faible, ce qui suggère une régulation du complexe des M&R par voies d'actions associées à la biodiversité. Ce qui m'a amené à me questionner sur le rôle de la biodiversité, et particulièrement les arbres d'ombrages, dans ces voies d'actions qui sous-tendent le service de régulation.

### 2.3.2. Rôle de l'organisation des arbres d'ombrages (composition et structure) sur la régulation des M&R

Afin de comprendre comment les arbres d'ombrages influencent les processus de régulations des M&R dans les SAFs de caféiers, nous avons mis en place une expérimentation, entre 2016 et 2018, dans la région de La Dalia au Nicaragua. Au Nicaragua, les petites productions familiales sont majoritaires, les SAFs sont principalement composées de *Coffea arabica* (Toledo and Moguel, 2012), et les arbres d'ombrage y sont très diversifiés (Cerdán et al., 2012). Nous avons établi un réseau de parcelles dans 3 fermes qui permettait de couvrir un gradient de diversité d'arbres d'ombrage associé. Nous avons mis en place un protocole spatialisé « arbre centré » où étaient caractérisés les caféiers et de leurs maladies foliaires, ainsi que les espèces d'arbres d'ombrage associés (Durand-Bessart et al., 2020) dans

un rayon de 7 m autour de l'arbre d'ombrage central. L'analyse des données a été réalisée dans le cadre du stage de Master 2 de Clémentine Durand-Bessart, qui a construit une méthode d'analyses spatiales pour évaluer l'effet des arbres d'ombrage (par leur présence et leur abondance) sur la régulation des maladies foliaires des caféiers. Un focus particulier a été mis sur la maladie de la tache américaine (Ojo de Gallo en espagnol, soit OG dans le texte) en raison de sa très forte incidence dans ces systèmes où est cultivée une variété particulièrement sensible à cette maladie.

Nous avons calculé un indice d'effets que peuvent avoir les arbres d'ombrages, basé sur leur hauteur et leur distance au caféier (Leandro-Munoz et al., 2017; Ngo Bieng et al., 2017). D'abord, les 54 espèces d'arbres d'ombrages identifiées ont été regroupées en 6 groupes 'Guaba', 'Laurel', 'Guineo', 'Timber', 'Fruit', 'Services', 'Citrus', sur la base de variables qualitatives et quantitatives : espèce, famille, hauteur totale, circonférence (Cerdán et al., 2012), usages des arbres (Grijalva, 2006), hôtes de maladies du caféier (tache Américaine, cercosporiose, anthracnose) (Boshier et al., 2009; Cerdán et al., 2012).

Ensuite, nous avons calculé la distance  $d$  entre chaque caféier et les différents arbres appartenant à l'unité dans laquelle il se situe, grâce aux coordonnées uniques de chaque arbre et caféier. Puis, nous avons cherché à déterminer à quelle distance les différents groupes d'arbres d'ombrage prédisaient le mieux la sévérité des maladies foliaires pour chaque caféier (chaque maladie séparément, et toutes maladies confondues). Pour cela, nous avons calculé un coefficient  $\alpha$  pour chaque groupe  $g$  d'arbres pour une variable maladie donnée (Figure 22). Plus les coefficients  $\alpha$  sont élevés, plus l'effet du groupe d'arbre d'ombrage est restreint à une faible distance, comme pour les groupes 'Guineo' et 'Fruit', dans le cas de la sévérité de la maladie de la tache américaine (ou Ojo de Gallo en espagnol : OG) (Figure 22-B). A contrario, un coefficient  $\alpha$  faible veut dire que l'effet de l'arbre est effectif à une plus grande distance, voire plutôt diffus comme dans le cas des 'Laurel'. Les coefficients  $\alpha$  sont plus faibles dans le cas de la sévérité totale, ce qui veut dire que les effets des groupes s'étendent à une plus grande distance (Figure 22-A).

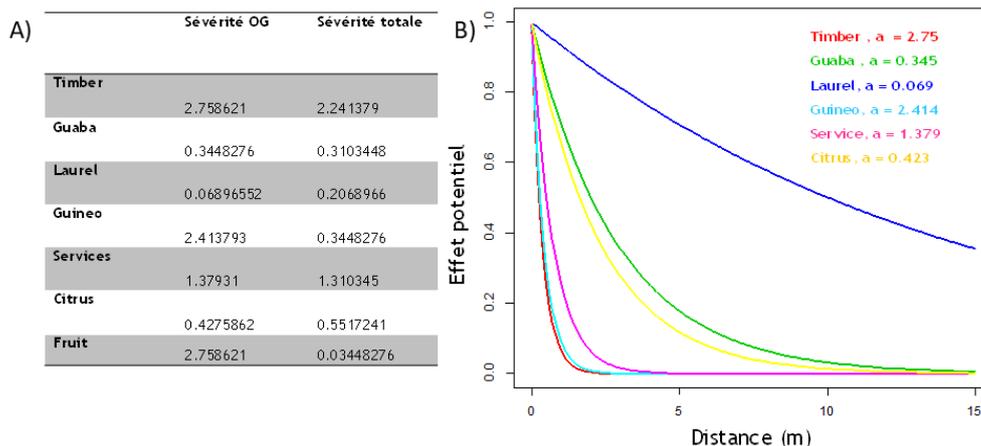


Figure 22. Tableau présentant les différentes valeurs des coefficients  $\alpha$ , en fonction de la sévérité de la maladie de la tache américaine (Ojo de Gallo en espagnol :OG), et de la sévérité totale des maladies foliaires (A). Le graphique (B) représente les effets potentiels des arbres d'ombrage (avant pondération par la hauteur) sur la sévérité de l'OG, en fonction de leur distance aux caféiers.

Nous avons ainsi pu déterminer à quelle distance chaque groupe d'arbre d'ombrage avait un effet sur les maladies foliaires du caféier, mais sans en définir le sens de l'effet (positif ou négatif). Pour cela, nous avons construit un modèle complet incluant les effets des groupes, permettant ainsi de tester la

significativité des effets des arbres d'ombrages sur les maladies et le sens de l'effet en étudiant la valeur du coefficient de corrélation (Figure 23).

Concernant la sévérité de la tache américaine (SevOG) (Figure 23-A), les effets des 'Citrus' et les 'Guaba' ont des effets positifs, c'est-à-dire que leur présence favorise le développement et la dispersion de l'OG. Alors que les 'Guineo' et 'Services' ont des effets négatifs ou de régulations. De même que les groupes 'Fruit' et 'Laurel', mais seulement pour le modèle avec la sévérité de l'OG. Pour la sévérité totale (Figure 23-A), les coefficients de régression sont plus faibles que pour la sévérité de l'OG. Seuls les groupes 'Services' et 'Laurel' ont un effet de régulation sur le développement global des maladies foliaires. Les autres groupes ont un coefficient de régression positif, c'est-à-dire que leur présence favorise le développement des maladies. Pour les 'Guineo' et les 'Fruit' ces effets sont opposés à leur effet sur l'OG.



**Figure 23. Coefficient de régression des effets de chaque groupe d'arbres sur la sévérité de la maladie de la tache américaine (SevOG) (A) et de la sévérité de l'ensemble de maladies foliaires (SevTOT) (B), du modèle GLMM final.**

Cette analyse met en évidence les effets des trois espèces principales d'arbres d'ombrages : Laurel, Guaba, Guineo, et des groupes 'Citrus', 'Fruit', 'Services' et 'Timber' sur les maladies foliaires du caféier. Ces résultats confirment que l'ombrage a des effets antagonistes sur les différentes maladies qui composent le complexe de M&R, (section 2.2.2), mais montrent que selon les espèces ou groupes d'arbres, ces effets sont différents. Ces différences sont liées aux caractéristiques architecturales et fonctionnelles de chacune des espèces d'arbres et/ou groupe d'arbres, qui peuvent avoir des effets sur les différentes voies d'actions impliquées dans la régulation des M&R.

Nous avons mis en évidence que le groupe 'Guaba' composé des espèces du genre *Inga*, a un effet positif sur le niveau d'infestation des maladies foliaires, particulièrement *Mycena citricolor*, tout comme les espèces du groupe 'Citrus'. Or, les *Inga sp* et les *Citrus* sont des hôtes alternatifs de *Mycena citricolor* responsable de la maladie de la tache américaine (Bedimo et al., 2008; Schroth et al., 2000).

*Mycena citricolor* est une maladie à large spectre qui peut attaquer au moins 219 espèces végétales appartenant à 80 familles (Granados Montero, 2015). Et la maladie de la tache américaine dépend davantage de la quantité d'inoculum primaire que du taux d'infection ( $r$ ), ce qui suppose que la mise en œuvre de stratégies de gestion visant à réduire le niveau d'inoculum initial retarderait considérablement le développement de l'épidémie (Wang and Arauz, 1999).

Le groupe 'Service ' et le Laurel *Cordia alliodora*, ont un effet régulateur sur la dispersion et le développement du complexe de maladies foliaires, à grande distance pour le Laurel, et plutôt à faible distance pour les arbres du groupe 'Services'. Ces 2 espèces sont des espèces de grandes tailles par rapport aux 'Citrus' et 'Guineo' qui sont de petite taille et favorise le complexe de maladies foliaires, à très faible distance pour le 'Guineo' (<2m) et à distance moyenne pour les 'Citrus' (<5m). La variabilité des traits architecturaux des arbres d'ombrage, mais également de leurs traits fonctionnels modifient les conditions microclimatiques (température, humidité) de manière différente selon les espèces (Gagliardi et al., 2021). Cela peut aussi affecter la dispersion des maladies par le vent (Dupont et al., 2022; Gagliardi et al., 2020), ou par effet splashing (Motisi et al., 2019). L'organisation dans l'espace de ces différentes espèces semble également importante, en effet, les bananiers ou 'Guineo' de faible hauteur ont un effet positif fort sur la régulation de *Mycena citricolor* à très faible distance ce qui laisse supposer son rôle comme barrière à la dispersion de la maladie de la tâche américaine.

Cette étude démontre l'importance de prendre en compte l'organisation de la diversité des arbres d'ombrage au sein des SAFs pour optimiser la régulation du complexe des M&R. Mais nous avons dans cette analyse uniquement prise en compte les effets directs des arbres d'ombrage sur les niveaux d'incidence de sévérité des M&R, sans intégrer la dimension production c'est-à-dire l'impact de ces M&R sur le rendement, qui nécessite alors de considérer également les voies d'actions indirectes.

### **2.3.3. Des interactions complexes entre les composants du système : mise en évidence des effets directs et indirects des arbres d'ombrages sur la régulation de M&R**

Nous avons donc cherché à analyser les interactions entre les composants de ces agrosystèmes, soit les arbres d'ombrage, le sol, les maladies foliaires, et les facteurs de croissance et de production en mobilisant des outils statistiques pour l'analyse des réseaux d'interactions. Les modèles de type équation structurelle permettent de comprendre et de prédire le fonctionnement de systèmes complexes (Hoyle, 2012; Vinzi and Trinchera, 2013) ; tels que les régulations écologiques dans les SAFs.

Les arbres associés aux parcelles de café soutiennent la régulation biologique par le biais de processus directs et indirects (Ratnadass et al., 2012). Dans le cas de SAFs, les effets potentiels de régulation directs qui réduisent les maladies impliquent différents processus, notamment : 1) la dilution de la densité de l'hôte, 2) la réduction des maladies du sol en favorisant les microorganismes bénéfiques, 3) les effets allélopathiques, 4) le réservoir d'ennemis naturels, 5) la création de microclimats défavorables aux maladies et 6) l'effet de barrière. Les arbres d'ombrage peuvent avoir des effets indirects bénéfiques sur les caféiers, dans le cas de légumineuse en améliorant la nutrition du café (Sauvadet et al., 2018). Dans des agroécosystèmes complexes avec une grande diversité végétale spatialement hétérogène associée aux plants de café, élucider les effets directs et indirects des arbres d'ombrage sur tous les systèmes de culture de café représente un grand défi.

Nous avons étudié pendant 2 années le réseau des 60 parcelles situées dans les trois exploitations au Nicaragua caractérisés par 40 variables. Ces variables caractérisaient six composants du système regroupés en six blocs statistiques : les arbres d'ombrage (pourcentage d'ombrage et abondance

des espèces), les caractéristiques du sol (fertilité), les maladies foliaires, les caractéristiques des caféiers (âge et taille), la croissance du café et le rendement. Nous avons utilisé la modélisation par équations structurelles en moindres carrés partiels (PLS-PM), c'est-à-dire une approche de modélisation des équations structurelles utilisée pour comprendre et quantifier les interactions entre les six blocs.

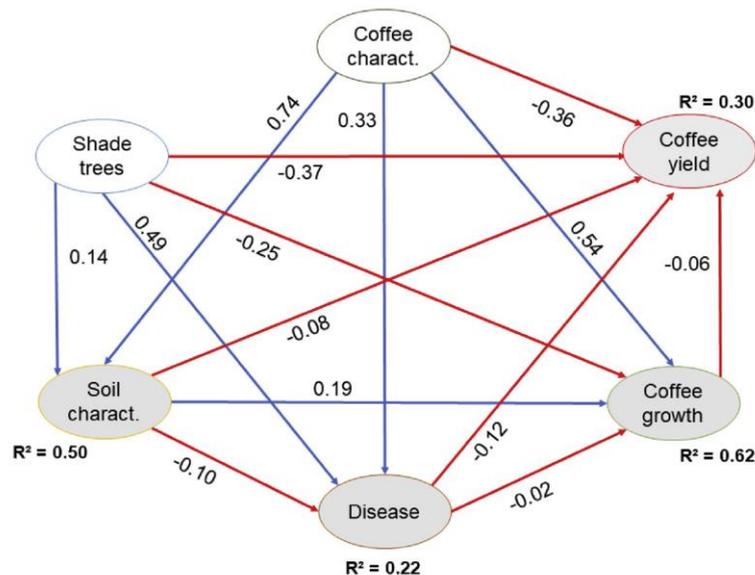


Figure 24 : Résultats du modèle structurel représentant le réseau d'interactions entre les blocs représentant les composants du système étudié. Chaque flèche représente l'intensité et le sens des effets entre chaque variable latente. Les flèches bleues représentent un coefficient positif et les flèches rouges un coefficient négatif.

Nous avons montré que les arbres d'ombrage (principalement le pourcentage d'ombrage associé) avaient des effets positifs directs sur la gravité et l'incidence des maladies foliaires et la qualité du sol, tout en ayant des effets négatifs sur la croissance et le rendement du café. Les caractéristiques du sol (carbone, azote, indice de litière, potentiel d'infiltration de l'eau) étaient négativement corrélées avec les maladies foliaires. Un pourcentage d'ombrage excessif avait alors un effet négatif indirect sur la croissance et le rendement du café en raison de l'incidence accrue des maladies foliaires. Trouver le couvert d'ombrage optimal peut aider à réduire les maladies foliaires et à améliorer la production de grains de café. L'effet de « dose » du couvert d'ombrage doit également être pris en considération, car un ombrage excessif, ainsi que le manque d'ombrage, a des impacts négatifs sur la croissance et le rendement du café. Dans l'ensemble, une gestion efficace de l'ombrage nécessite une analyse des compromis entre la qualité du sol, la régulation des maladies et les gains de rendement.

En conclusion, le PLS-PM s'est avéré être un bon outil pour étudier les réseaux agroécologiques et nous a permis de proposer quelques lignes directrices pour la gestion des maladies foliaires et l'amélioration du rendement du café.

Nous avons mis en évidence que la production de café résultait d'un ensemble de facteurs dérivés des effets directs et indirects de tous les composants du système. Tous les effets au sein de l'agroécosystème doivent être pris en compte pour parvenir à une gestion équilibrée des maladies foliaires. Il est désormais essentiel de quantifier le compromis entre les arbres d'ombrages, les caractéristiques du sol, les maladies, la croissance du café et le rendement afin d'améliorer la gestion globale de l'agroécosystème.

#### 2.3.4. Conclusion : vers l'optimisation de l'organisation de la biodiversité

Dans les systèmes de production sans usage de biocides (pesticides chimiques ou biologiques), l'impact du complexe de M&R sur le rendement, qui se traduit par des pertes de rendement, est le résultat de la somme des interactions entre les différentes voies d'actions qui sous-tendent le service de régulation, et qui sont supportées par la biodiversité présente dans les différents composants du système (strate arborée ou arbres d'ombrages, strate herbacée, plante cultivée, sol). La compréhension de ces interactions et leur prise en compte est primordiale pour concevoir des SAFs complexes, basés sur l'optimisation de l'organisation de la biodiversité végétale. L'agencement spatial, horizontal et vertical est un levier majeur pour favoriser les mécanismes de régulation des M&R, et *in fine*, limiter les pertes de rendements.

Mais en plus de révéler les voies directes et indirectes reliant la diversité d'arbres d'ombrage et la régulation des M&R, mes travaux ont également mis en évidence que les arbres d'ombrages soutiennent également des voies d'actions qui affectent directement le rendement accessible, en favorisant par exemple la fertilité du sol. Il s'agira donc par la suite de caractériser plus précisément l'ensemble des SE pouvant avoir un rôle déterminant dans l'élaboration du rendement - conservation des sols, cycle des nutriments, pollinisation, habitat – afin de chercher à optimiser, à une échelle spatiale arbre centré, d'une part la régulation et d'autre part la fourniture d'autres SE d'intérêt. Ainsi, il s'agira de mobiliser deux leviers simultanément, la réduction des pertes causées par les M&R d'une part et l'augmentation du rendement accessible d'autre part, afin d'améliorer la production dans les SAFs complexes et donc leur durabilité, principalement économique, en se basant uniquement sur l'optimisation de la biodiversité.

#### 2.4. REFLEXIONS AUTOUR DE LA PARTIE BILAN :

##### Aller plus loin dans la modélisation

L'évaluation des pertes de rendement dues à un complexe de M&R est une étape nécessaire pour la conception de SAFs durables sous pression de facteurs biotiques. Mais c'est une étape délicate, qui demande la construction et la mise en œuvre d'une méthodologie spécifique, propre au modèle biologique étudié et au système dans lequel il est cultivé. J'ai eu recours dans mes travaux à de l'expérimentation, essentielle pour générer des données situées et objectiver les cadres théoriques mobilisés. L'utilisation de la modélisation, conceptuelle et statistique, a permis de construire des outils (mise en évidence d'indicateurs, équations prédictives) pour l'évaluation et la quantification des pertes de rendements chez le caféier, mobilisables dans une large gamme de diversification de SAFs. Les résultats obtenus pourraient être utilisés pour la construction de modèles de prédictions mécanistes, en s'appuyant sur des modèles de culture déjà existants sur le modèle caféier (Van Oijen et al., 2010; Van Oijen et al., 2022; Vezy et al., 2020), afin de disposer d'un outils prédictif de simulation, avec toutes les précautions qu'une telle approche nécessite de prendre en compte : robustesse du modèle dans une large gamme de situations, prise en compte des interactions entre les différents composants biophysiques du système, prise en compte de la dynamique interannuelle. J'ai bien envisagé d'explorer ces pistes, mais je pense que l'approche multipest, par sa nature systémique, doit plutôt être intégrée dans un modèle construit spécifiquement pour répondre à des enjeux de conception, afin de mettre en relation des profils de dégâts, les pertes associées et les pratiques culturales (Robin et al., 2013) et de mobiliser cet outil pour alimenter des réflexions et discussions avec les acteurs dans le cadre d'ateliers de co-conception (Meylan, 2012). La construction d'un tel modèle pourrait alors être intégré

au sein d'une chaîne de modélisation pour évaluer un ensemble de SE fournis dans une large gamme de diversification de SAFs comme cela a été proposé pour évaluer les associations céréales-légumineuses (Meunier et al., 2022). Il serait alors possible d'explorer, par simulation, un grand nombre de situations de transition vers des SAFs plus durables. Les résultats obtenus par expérimentation montrent bien qu'il existe de larges marges de manœuvre pour augmenter la durabilité des SAFs à base de caféiers en proposant des systèmes multifonctionnels basés sur l'évaluation de plusieurs SE. Mais il manque aujourd'hui des outils pour accompagner les producteurs de café dans la transition et les amener à reconcevoir leurs systèmes dans une logique de conception participative.

### **Prendre en compte plus de composants dans le système**

Jusqu'ici, je ne me suis intéressé qu'à un nombre limité de composants des systèmes (arbres d'ombrages, sol, caféier et complexe de M&R), et les résultats suggèrent que d'autres composants devraient être pris en compte pour rendre compte de l'ensemble des interactions qui régissent le fonctionnement du système. Je n'ai pour le moment jamais intégré le compartiment des auxiliaires de cultures (champignons antagonistes ou prédateurs) alors son impact sur le complexe de M&R peut être déterminant. Par exemple, le rôle des fourmis dans la régulation du scolyte est largement documenté par les écologues (Philpott and Armbrecht, 2006; Philpott et al., 2008), ainsi que l'effet de la diversité d'arbres d'ombrages sur les populations de fourmi, à des échelles parcellaires (Bagny-Beilhe et al., 2020) et paysagères (Aristizabal and Metzger, 2019). De même, certains champignons entomopathogènes sont reconnus comme agents de contrôle comme *Beauveria bassina* pour contrôler le scolyte (Posada et al., 2007), et *Lecanicillium lecanii* pour contrôler la rouille (Jackson et al., 2012). Par ailleurs, ces différents ennemis naturels constituent des communautés écologiques dont la dynamique est régie par des interactions complexes au sein du système (Vandermeer et al., 2019). La question est donc de savoir comment prendre en compte cette communauté d'ennemis naturels dans une approche systémique ? Doit-on construire une approche similaire à celle développée pour prendre en compte le complexe de M&R, et évaluer des profils d'ennemis naturels en association avec des profils de M&R et des pertes de rendement associées ? Ou bien doit-on considérer que les profils d'ennemis naturels sont déterminés par un niveau de biodiversité végétale donnée et alors juste prendre en compte ce compartiment comme une « boîte noire », sans forcément expliciter les voies d'actions spécifiques liées à des processus écologiques ? Je pense que si l'on cherche à co-concevoir des systèmes dont la gestion permet de réduire au maximum les pertes de rendement, notamment par l'introduction d'ennemis naturels dans le système, alors, il faudra prendre en compte dans le futur le complexe d'ennemis naturel comme un compartiment à part entière.

Un autre composant qu'il semble difficile d'ignorer aujourd'hui, à la lumière des découvertes récentes sur la complexité du microbiote des plantes et aux nouvelles perspectives de la théorie de l'holobionte (Hassani et al., 2018), est le microbiote du caféier. Plus précisément c'est le microbiome qu'il serait pertinent d'intégrer dans une approche systémique de la régulation des M&R du caféier, en tant que résultat de l'interaction entre les gènes des micro-organismes et leur environnement. Une approche globale devra être envisagée, sachant que le microbiote peut avoir des effets antagonistes sur le développement des M&R, en réduisant le développement de certaines maladies tout en favorisant (Stevens et al., 2021). Les micro-organismes associés au caféier ont été récemment isolés et caractérisés afin de mettre en évidence leurs caractéristiques utiles et d'étudier leur potentiel d'utilisation comme alternative durable aux intrants agrochimiques. En effet, plusieurs microorganismes (y compris des bactéries et des champignons) sont capables de présenter des capacités de promotion de la croissance des plantes et/ou des

capacités de lutte biologique contre les M&R (Duong et al., 2020). Ce composant est d'autant plus important à considérer que depuis une dizaine d'années, l'utilisation de micro-organismes dits « efficaces » est de plus en plus répandue dans les coopératives et chez les producteurs comme alternative aux intrants agrochimiques. J'ai eu l'occasion de travailler plusieurs fois avec des coopératives de café développant et promouvant leurs propres biofertilisants liquides et bioferments (dis « bioles » en espagnol), qui sont des produits élaborés à partir de la fermentation semi-contrôlée de matières premières naturelles facilement accessibles, telles que les fumiers, les résidus végétaux, la mélasse et des inoculum microbiens (souvent issus de zones de forêts isolées, appelées pour cela en espagnol « micro-organismo de montaña ») (Uribe et al., 2010). Ils peuvent servir de source alternative de microéléments, ou être mélangés avec des sels minéraux comme biofertilisant (Urtecho, 2005). Comme le mentionnent Viquez *et al.*, (2008) (Viquez et al., 2008), les bioles constituent une source de régulateurs de croissance végétale qui, bien qu'ils soient présents à de faibles concentrations, peuvent avoir un effet notable sur les plantes. L'évaluation de ces intrants (appliqués par fumigation ou directement au sol) a été un casse-tête pour moi (travaux non présentés dans mon bilan). Bien que les bioles produits dans mon expérimentation présentaient un niveau élevé de diversité microbienne je n'ai pu mettre en évidence aucun résultat significatif, sur le complexe de M&R étudié ni sur la composition chimique des feuilles, la composition chimique du sol, ou sur la croissance et les composantes du rendement. Pourtant, les producteurs sont restés convaincus de leur efficacité, et cela m'a amené à commencer à me questionner sur la notion de perception de la santé par les producteurs, et les indicateurs d'évaluation utilisés (échelle biologique et temporelle).

### **Construire et/ou adapter de nouvelles méthodologies d'analyses**

Une question récurrente dans mes travaux est celle des outils méthodologiques pour étudier la régulation par la biodiversité, et plus largement celle de l'implémentation d'un protocole expérimentale pour étudier des processus agroécologiques dans des systèmes diversifiés complexes. Les questions que j'aborde nécessitent de construire des outils à l'interface entre les outils issus de l'agronomie (étude multifactorielle, intégrant des répétitions) et de l'écologie (étude des processus en conditions naturelles non contrôlées), et cela représente, à mon sens, un défi de l'agroécologie. Quels protocoles expérimentaux de terrain construire pour étudier un SE et plus spécifiquement dans mon cas le service de régulation ? Pour caractériser les interactions au sein du système ? Pour mettre en évidence des indicateurs ? Pour analyser les compromis entre SE ? Quelle est l'échelle spatiale à observer pour documenter les fonctions de l'agroécosystème attendues ? En réponse, en partie à ces questions, nous avons porté une réflexion au sein de l'UMR ABSys et proposé un concept pour la conception, la modélisation, la surveillance et l'audit des services écosystémiques désirés dans les systèmes de cultures intercalaires et agroforestiers (Rafflegeau et al., 2023). Nous avons nommé ce concept ESSU (Ecosystem Services functional Spatial Unit). Il délimite la plus petite unité spatiale englobant toutes les espèces en interaction et d'autres composantes fonctionnelles (par exemple, cultures, arbres, bétail, végétation spontanée, habitats semi-naturels tels que les haies, les fossés, les parcelles forestières et les animaux) qui fournissent ensemble un ensemble spécifié de SE. Le concept novateur d'ESSU permet la représentation de tout un agroécosystème diversifié par la répétition de l'unité spatiale fournissant les mêmes ensembles de services écosystémiques ciblés que l'agroécosystème qu'elle représente.

Ces réflexions, d'ordre épistémologique puisqu'il s'agit d'explorer les différentes méthodes utilisées pour acquérir des connaissances nouvelles, devraient être portées par l'ensemble de la communauté de pratique autour de l'agroécologie. L'élaboration de protocoles de recherches en agroécologie, de l'implémentation aux analyses statistiques (équation structurel, statistiques

spatiales, statistiques bayésiennes, ect...), est –il standardisable ? J’imagine qu’un jour, ce soit des méthodologies bien établies, mais pour le moment, je pense qu’il reste encore à explorer, adapter et s’approprier de nombreux outils existants et d’en construire de nouveaux pour documenter des questions en rupture que pose l’agroécologie.

#### 3.1. LES POINTS D'INFLEXION

Le projet de recherche que je souhaite concrétiser maintenant s'inscrit dans la continuité de mes travaux précédents, mais marqué par plusieurs inflexions fortes, qui me semblent nécessaires au vu des enjeux identifiés et des nouvelles questions qu'ils soulèvent, mais aussi pour repousser les limites méthodologiques et épistémologiques mises en évidence dans mes recherches passées. Ces inflexions sont: 1) intégrer de nouvelles espèces cultivées pérennes dans les SAFs et étudier les opportunités que cela offre en terme de durabilité pour les producteurs ; 2) passer d'une approche pathogénique à une approche salutogénique et prendre en compte les déterminants de la santé des plantes pour concevoir des systèmes résilients au M&R; 3) prendre en compte et quantifier les disservices écosystémiques dans l'évaluation des systèmes pour appuyer l'aide à la décision et l'accompagnement dans le changement de pratiques vers l'agroécologie.

##### 3.1.1. Intégration de nouveaux modèles biologiques pour la conception de SAF plurispécifiques à base de plantes pérennes

Les travaux que j'ai menés sur les systèmes agroforestiers à base de caféiers, principalement avec des producteurs de petites exploitations (< 2ha), m'ont amené à constater que la durabilité de ces systèmes était contrainte par deux principaux facteurs auxquelles doivent faire face aujourd'hui les caféiculteurs : la fluctuation des marchés, et le changement climatique. Les évaluations socio-économiques que j'ai réalisées m'ont amené à réfléchir sur la manière de rendre économiquement viables des systèmes dépendants d'une ressource de rente d'exportation cotée en Bourse. En effet, la fluctuation des marchés et la spéculation autour de cette ressource augmentent l'incertitude des revenus pour les producteurs, conduisant à des situations économiques souvent précaires. De plus, le café étant une culture majoritairement cultivée sur des gradients altitudinaux, l'impact du changement climatique sur l'aire de répartition de la culture est fulgurant. Les zones de basse altitude de culture du café, comprise entre 600 et 800 mètres, deviennent inadaptées, et de nombreux producteurs cherchent des alternatives. J'ai observé au Nicaragua et au Costa Rica une transition notable vers la culture du cacaoyer dans les SAFs à base de caféiers déjà existants, soit en remplacement, soit en cultures associées.

Ainsi, toujours dans une logique de conception de SAFs à base de plantes pérennes qui soient durables socialement, économiquement, et écologiquement, j'ai décidé de construire mon projet de recherche afin de répondre à ces deux principaux enjeux, tout en restant dans la continuité de mes précédents travaux.

L'idée est d'introduire dans les systèmes étudiés, une diversité dans les plantes cultivées, en plus de la diversité d'arbres d'ombrages présents dans les SAFs, et de réfléchir à la **conception de systèmes plurispécifiques à base de caféiers, cacaoyers, et musacées (banane et plantain)**. L'introduction systématique de musacées vise à garantir une ressource économique pour des marchés locaux tout en assurant la sécurité alimentaire du foyer. Mon point focal reste la conception de systèmes sans usage de pesticides et la réduction de l'impact des maladies et ravageurs.

L'intégration de nouveaux modèles biologiques (cacaoyer et bananier/plantain) permettra **d'approfondir l'étude de la relation dégât-dommages pour la quantification des pertes de rendements**. L'étude de nouveaux complexes de M&R impactant des plantes aux fonctionnements

physiologiques (pérenne vs semi-pérenne) et écophysiologicals différents permettra de prendre en compte des profils de dégât et des mécanismes de dégâts non étudiés jusqu'à maintenant (Tableau 7).

**Tableau 7 : Positionnement des différents modèles biologiques étudiés (Musacée, Cacaoyer et Caféier) en fonction de leurs mécanismes et profils de dégâts.**

profils de dégât mécanismes de dégâts	feuilles		branches, tronc (pseudo tronc)		racines		fruits	
	nécroses	chutte	mort	alération de la croissance	mort	alération de la croissance	altération	chutte
Photosynthèse/respiration								
Transport de l'eau et des nutriments								
Transport des photoassimilats								
préservation des structures reproductives								
préservation des structures de réserve								
préservation des structures productives								

La spécificité de chaque modèle biologique pourra permettre d'alimenter les connaissances globales sur la quantification des pertes de rendements dans le cas des plantes pérennes et semi-pérennes. Les notions de pertes primaires et secondaires pourront être explorées à travers des mécanismes de dégâts spécifiques pour chaque modèle. Comme je l'ai abordé précédemment sur le caféier, il est possible de construire des modèles conceptuels pour chaque modèle biologique, puis d'établir des relations statistiques entre les pertes observées et des dégâts associés. Cette approche a jusqu'ici été pertinente pour aborder le cas des profils de dégâts associés au complexe des M&R aériens du caféier et des mécanismes de dégâts associés. Mais cette approche permettra-t-elle de rendre compte de la relation dégât-dommage dans le cas de plantes semi-pérennes, dans la mesure où le cycle de développement et le cycle de culture d'une espèce affectent la dynamique des M&R et leur impact sur le rendement ? Je pense que l'appui de physiologistes et d'agronomes sera nécessaire pour aborder les questions relatives aux dégâts causés notamment par les charançons du bananier et les nématodes présents à la fois chez le caféier et le bananier.

Je chercherais également à prendre en comptes et caractériser les différents niveaux d'interactions qui émergeront dans ces systèmes complexes :

**Interactions spécifiques au sein de chaque complexe :** Comme je l'ai montré sur le caféier, il est attendu également chez le cacaoyer et les musacées d'observer des interactions (antagonisme ou synergie) au sein des complexes de M&R de chaque espèce, qu'il sera nécessaire de caractériser. Le complexe de M&R étant spécifique en fonction de la zone géographique, du topoclimat et des pratiques de gestion, les complexes étudiés seront spécifiques des sites d'expérimentations.

**Interactions entre complexes de M&R :** Les différents modèles biologiques partagent certaines M&R, par exemple les nématodes (*Meloidogyne spp* et *Pratylenchus spp*) qui affectent aussi bien les caféiers que les musacées. Dans le cas d'associations entre plantes cultivées dont les complexes de M&R peuvent partager certains M&R, il est donc primordial d'étudier les dynamiques d'interaction entre les M&R concernés au sein de systèmes multiespèces.

**Interactions entre plantes cultivées et complexes de M&R :** Les systèmes associant musacées et cacaoyers, ou musacées et caféiers existent déjà, et sont étudiés principalement par le prisme d'une des deux plantes cultivées en mélange, la deuxième culture étant alors considérée comme étant au service d'une culture principale. Des études récentes documentent les bénéfices économiques des systèmes associant bananiers et caféiers (Tehulie and Nigatie, 2023) et bananiers et cacaoyers (Aboah

and Setsoafia, 2022; Salazar-Díaz and Tixier, 2021), mais il n’y a à ce jour aucune étude sur les processus et mécanismes impliqués dans la régulation des M&R dans ces systèmes. La question de la gestion de plusieurs complexes de M&R devra également être abordée dans une logique de co-conception.

**Interactions entre plantes cultivées, complexes de M&R et biodiversité associée :** Je propose également d’étudier les effets de la biodiversité, et des différents composants qui la compose (arbres d’ombrages, strate herbacée, sol, complexe d’ennemis naturel, microbiote) sur la régulation du complexe de M&R dans le cas de systèmes multisécifiques : sont-ils synergiques - additif ou complémentaire ? sont-ils antagonistes ? Existe-t-il des propriétés émergentes valorisables pour la conception de systèmes complexes ?

### 3.1.2. Vers un nouveau paradigme de recherche : du pathogène vers le salutogène

Les recherches que j’ai menées jusqu’ici ont porté sur la réduction de l’impact des M&R sur le rendement, en me focalisant sur les déterminants des profils de M&R et des pertes associées. Cette approche s’inscrit dans une logique centrée sur les M&R, et répond à des questions en lien avec la protection des cultures (Vega et al., 2020): comment gérer un stress biotique ? Pourquoi la présence de M&R devient-elle préjudiciable ? Quelles sont les faiblesses de l’agroécosystème qui font que certains organismes atteignent le statut de nuisible ?

Je me suis focalisée jusqu’ici sur une notion de gestion de la santé des plantes telle que définie par Cook en 2000 (Cook, 2000): « Plant health management is the science and practice of understanding and overcoming the succession of biotic and abiotic factors that limit plants from achieving their full genetic potential as crops ». Sauf que d’après cette définition, représentative de la vision de la santé des plantes portées dans de nombreux disciplines (sciences agronomique, phytopathologique, génétique, génomique) et qui répond aux enjeux de l’agriculture conventionnelle (Figure 3), la notion de “santé des plantes”, fait référence à un **état de la plante** définie par **l’absence d’un pathogène**, qui se traduit par **l’absence de symptômes** (Döring et al., 2012).

Or, en explorant le rôle de la biodiversité sur les voies d’actions permettant de réduire l’impact des M&R sur le rendement, il est apparu que la biodiversité soutient d’une part les voies d’actions impliquant directement la régulation des M&R, mais aussi des voies d’actions ayant un rôle déterminant dans l’élaboration du rendement accessible des plantes cultivées. Ces voies d’actions, liées à des fonctions de l’agroécosystème, peuvent être associées à des SE comme la conservation des sols et de leur fertilité, le cycle des nutriments, la pollinisation ou la régulation du climat.

Je pense nécessaire de faire évoluer ma vision de la santé des plantes, que je considère aujourd’hui comme la **capacité de la plante à ne pas subir de pression biotique** (ici M&R) en mobilisant **les ressources de son environnement** qui sont **générées par la biodiversité** et les fonctions écosystémiques associées. Il s’agit donc non pas d’un état, mais d’un processus dynamique systémique, qui maintient à la fois le complexe de M&R en dessous du seuil de nuisibilité et la plante productive malgré la présence de M&R. Cela se traduit par le maintien d’un rendement réel à un niveau acceptable pour le producteur, dans un contexte de diversification. Cela implique de définir également la notion de rendement économiquement acceptable, et de la situer le long d’un gradient et non par rapport à une référence maximale fixe (rendement potentiel).

Cette définition de la santé des plantes s’inscrit dans un modèle non pas « pathogénique », mais « salutogénique », tel que développé en santé humaine par Antonovsky, qui met l’accent sur les facteurs à l’origine du bien-être global (Mittelmark et al., 2022). La salutogenèse, ou l’origine de la santé, est un concept orienté vers la création et le maintien d’une bonne santé plutôt que sur la recherche de la cause de maladies spécifiques. Ce modèle est à l’opposé du modèle pathogène

traditionnel qui se concentre sur les facteurs de risque impliqués dans l'apparition de la maladie. Il cherche à répondre à : pourquoi certaines personnes, malgré des situations stressantes et des difficultés, restent en bonne santé ? La théorie peut être appliquée au niveau individuel, de groupe et sociétal (Lindström and Eriksson, 2005). Selon Antonovsky, la santé est perçue comme un mouvement sur un continuum le long d'un axe entre une santé - ou bien être totale (« ease » en anglais) et une maladie totale (« dis-ease » en anglais) (Figure 25). La capacité à maintenir et améliorer le mouvement vers la santé dépend de la capacité à comprendre l'ensemble de la situation et de la capacité à utiliser les ressources disponibles pour résoudre le problème (Mittelmark et al., 2022). En salutogénèse, l'accent est mis sur la capacité de la personne à utiliser les ressources internes et externes, à sa disposition pour gérer des situations stressantes omniprésente.

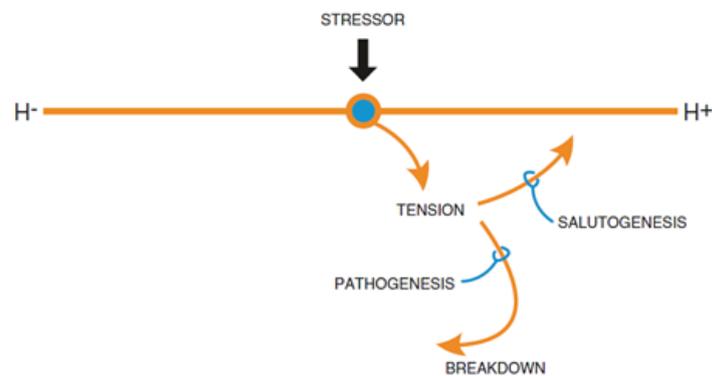


Figure 25 : Illustration du concept de mouvement le long d'un continuum du bien-être (H+) /maladie (H-). Comment une personne, où qu'elle se trouve sur le continuum, se rapproche-t-elle du pôle de la santé ? (Mittelmark et al., 2022)

Le concept de santé dans le domaine de la protection des cultures dans une perspective agroécologique peut être proposé en se basant sur ce modèle salutogène. Ainsi, **la capacité à maintenir et améliorer le processus de santé** dépendrait de la **capacité du producteur**, en tant qu'acteur et gestionnaire de l'agroécosystème, (la plante n'ayant pas intrinsèquement cette capacité) **à mobiliser les ressources disponibles dans son environnement** pour optimiser l'ensemble des voies d'actions favorisant à la fois la régulation des M&R et les SE qui sous-tendent le rendement accessible. Cette capacité de gestion doit être réfléchie à l'échelle du système et non pas à celle uniquement de la plante, il paraît donc difficile de dissocier la santé des plantes de celle de la gestion de l'agroécosystème.

L'appréhension de la santé des plantes se doit donc d'être systémique (Döring et al., 2012), car elle est le résultat d'interactions complexes entre (i) des facteurs biophysiques (système plante, maladie et ravageur, sol, biodiversité associée, climat) et (ii) des pratiques agricoles, qui sont elles-mêmes dépendantes des conditions socio-économiques des ménages agricoles. Pour concevoir des agroécosystèmes en « bonne santé », il est donc essentiel de comprendre la dynamique des interactions directes et indirectes qui ont lieu entre les composants biophysiques du système (Durand-Bessart et al., 2020), mais également l'influence des pratiques agricoles sur ces interactions (Durand et al., 2019) pour pouvoir identifier comment piloter les régulations biologiques par l'action combinée de différentes pratiques (Meynard, 2017). Il est donc question de comprendre les mécanismes et voies d'actions garantissant la résistance de la plante en présence de M&R, maintenus à un niveau non nuisible, *via* des pratiques adaptées de gestion de la biodiversité.

Dans mon projet de recherche, je fais l'hypothèse que l'organisation de la biodiversité (composition et structure verticale et horizontale) dans l'agroécosystème est la clé pour qu'il soit capable de se maintenir « en bonne santé ».

Ce changement de paradigme a également des implications à l'échelle de l'agroécosystème, dont les dynamiques possibles, en réponse à une perturbation, sont généralement caractérisées en terme de vulnérabilité, résilience, robustesse, et stabilité (Figure 26) (Dardonville et al., 2021; Urruty et al., 2016).

Rechercher les déterminants de la santé a pour but, *in fine*, de concevoir des agroécosystèmes résilients aux pressions biotiques, c'est-à-dire où la dynamique du système est telle que la présence de M&R ne constitue finalement pas un facteur de réduction du rendement inacceptable économiquement pour le producteur. Et dans le cas d'une perturbation dans la dynamique du système (épidémie, changement de pratique), alors le système devrait être capable de s'adapter, ce qui renvoie à la notion de résilience (Figure 26-d), définie comme la capacité à faire face, absorber et s'adapter aux perturbations, sans changer, dans le but de revenir à un état de normalité (Martin-Breen and Anderies, 2011; Urruty et al., 2016).

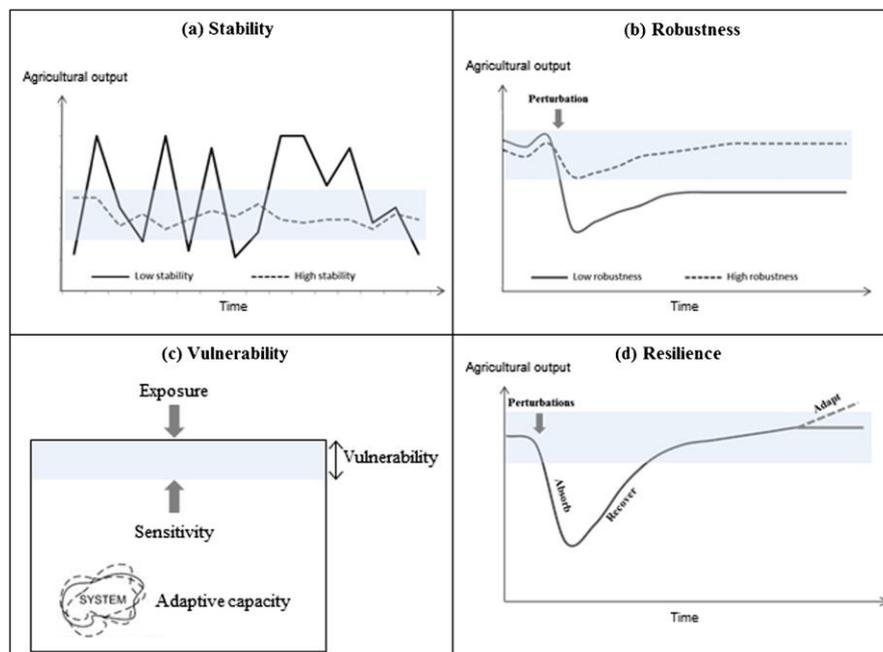


Figure 26 : Illustration des concepts de stabilité, de robustesse, de vulnérabilité et de résilience (Urruty et al., 2016)

Je donne ici une définition personnelle de la santé des plantes, en proposant de raisonner par analogie avec ce modèle salutogène (Vega et al., 2020), et à la lumière des résultats obtenus lors de mes travaux antérieurs. Je pense qu'un changement de paradigme est nécessaire aujourd'hui en protection des cultures pour explorer et proposer un cadre conceptuel en rupture, sans concessions par rapport à l'utilisation de pesticides chimiques ou biologiques, basé uniquement sur la mobilisation de la biodiversité, et générer de nouvelles connaissances, qui à terme, pourront être mobilisées pour concevoir des agroécosystèmes « en bonne santé », et donc durables.

Dans cette perspective, les principales questions qui me semblent importantes de soulever sont :

- Quelles voies d'actions et fonction écosystémiques sous-tendent le maintien en bonne santé des plantes cultivées ?
- Quelle organisation de la biodiversité permet d'optimiser ces voies d'actions ?
- Quelles pratiques de pilotage de la biodiversité garantissent le maintien de la santé des plantes et de l'agroécosystème ?
- Quels indicateurs permettent d'évaluer la santé des plantes cultivées et de l'agroécosystèmes ?

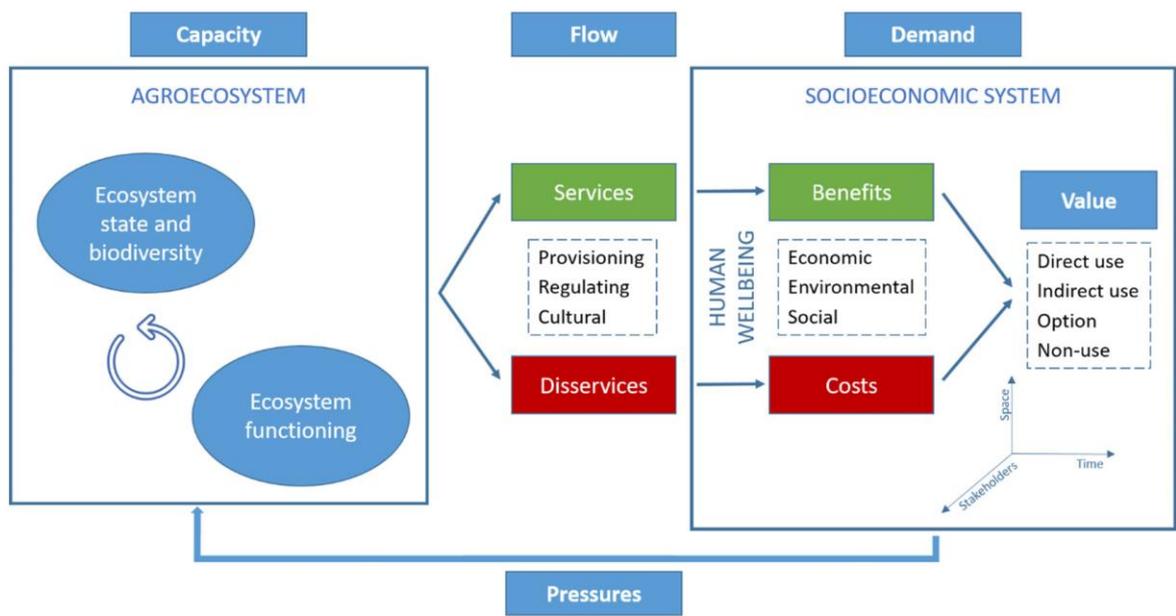
### **3.1.3. Prise en compte des disservices dans l'évaluation multicritère**

Dans une logique de conception de systèmes durables, j'ai pris en compte dans mes travaux antérieurs, la plus-value qu'offrirait la diversification des agroécosystèmes par l'introduction d'arbre d'ombrages, en quantifiant les SE dans un gradient de diversification. Les connaissances qui permettent d'établir le lien entre biodiversité, provision de SE et ressources économiques, sont à mon sens primordiales, pour disposer d'arguments crédibles et convaincants pour les producteurs pour accompagner la transition agroécologique à travers un processus de co-conception. Mais ce seul levier, en lien avec les bénéfices générés par la provision de SE, ne me semble pas suffisant pour promouvoir un réel changement de pratiques.

Au sein des agroécosystèmes, les SE résultent de l'interaction entre l'agroécosystème et l'intervention humaine. Cependant, cette interaction peut parfois avoir des conséquences négatives, notamment en altérant la capacité des agroécosystèmes à fournir ces services et en générant des disservices (DES), ayant des impacts défavorables sur la santé des plantes, de l'agroécosystème et le bien-être humain. De plus, des interactions entre les SE et les DSE sont attendues dans les agroécosystèmes, desquelles résultent plus de compromis entre eux que de solutions gagnant-gagnant. À leur tour, ces compromis sont favorisés par les pratiques agricoles, ce qui ajoute de la complexité à l'évaluation des agroécosystèmes (Tancoigne et al., 2014).

Selon le cadre théorique proposé par Zabala et al., (2021) illustré dans la Figure 27, les SE et DES fournis à l'échelle de l'agroécosystème, peuvent être catégorisés et évalués selon les typologies existantes des services écosystémiques. À l'échelle du socioécosystème, centré sur le bien-être humain (Ostrom, 2009), les SE et les DES sont considérés respectivement comme des bénéfices et des coûts, en fonction de leurs impacts sur le bien-être humain.

Les avantages et les coûts associés aux SE et aux DSE ne sont pas fixes dans l'espace et dans le temps, mais dépendent du contexte dans lequel ils sont définis (Díaz et al., 2018). La demande en SE et DSE, c'est-à-dire la quantité de services et de disservices désirés, est déterminée par l'ensemble de la société, et par conséquent par les préférences socioculturelles. Les préférences, supposées invariantes dans un contexte spécifique, sont établies à la fois par l'agroécosystème et par le cadre socioculturel dans lequel elles sont évaluées. Par conséquent, les parties prenantes jouent également un rôle clé dans la création de la demande au sein du système socio-économique. Leurs actions peuvent influencer non seulement la valeur fournie par les SE et les DSE, mais aussi, et surtout, la manière dont un agroécosystème est géré. Cette gestion aura à son tour un impact sur le fonctionnement de l'agroécosystème et donc sur sa capacité à générer des flux de SE et de DSE.



**Figure 27 : Cadre conceptuelle reliant le fonctionnement de l'agroécosystème, les services et les disservices, la valeur et les pratiques agricoles. (Zabala et al., 2021)**

La prise en compte des DSE qui accompagnent les pratiques de gestion conventionnelles, et particulièrement les externalités négatives liées à l'utilisation d'intrants d'origine anthropique comme les pesticides chimiques, me semble donc nécessaire pour disposer de davantage d'arguments et justifier de l'impact positif de la diversification des agroécosystèmes.

Cet élargissement des variables d'évaluation des agroécosystèmes aux DSE pose les questions suivantes :

- Quels DES sont induits par les pratiques visant à la protection des cultures ?
- Comment quantifier leur impact sur les santés, des plantes, des agroécosystèmes et des humains ?
- Quel changement d'échelle doit être opéré pour que l'analyse des compromis entre SE et DES soient cohérente ?

### 3.2. DEMARCHE DE RECHERCHE

C'est donc dans ce contexte global et pour répondre aux enjeux présentés ci-dessus (qui ne sont pas exhaustif de l'ensemble des enjeux liés à la gestion des M&R pour les modèles d'études étudiés), que je propose de développer ce projet de recherche, et de le mettre en œuvre à travers 3 axes thématiques, correspondant aux trois principales questions de recherches suivantes : Selon les questions traitées et les axes développés, le pas temps de ce projet est à court, moyen et long termes (3 à 5 ans, et plus de 5 ans). L'articulation des questions les unes par rapport aux autres est illustrée Figure 28.

#### **Q1- Quelle est la réponse de la relation dégât-dommage dans un gradient de complexité de système ?**

La principale question soulevée sera la prise en compte des effets d'interactions entre les différents pathosystèmes, les différentes plantes cultivées, et les autres composants du système : sont-ils

additifs ? sont-ils synergiques ? Quelle en est la résultante sur le rendement de chaque espèce et sur la rentabilité globale du système ? Existe-t-il des propriétés émergentes liées à un tel niveau de complexité ?

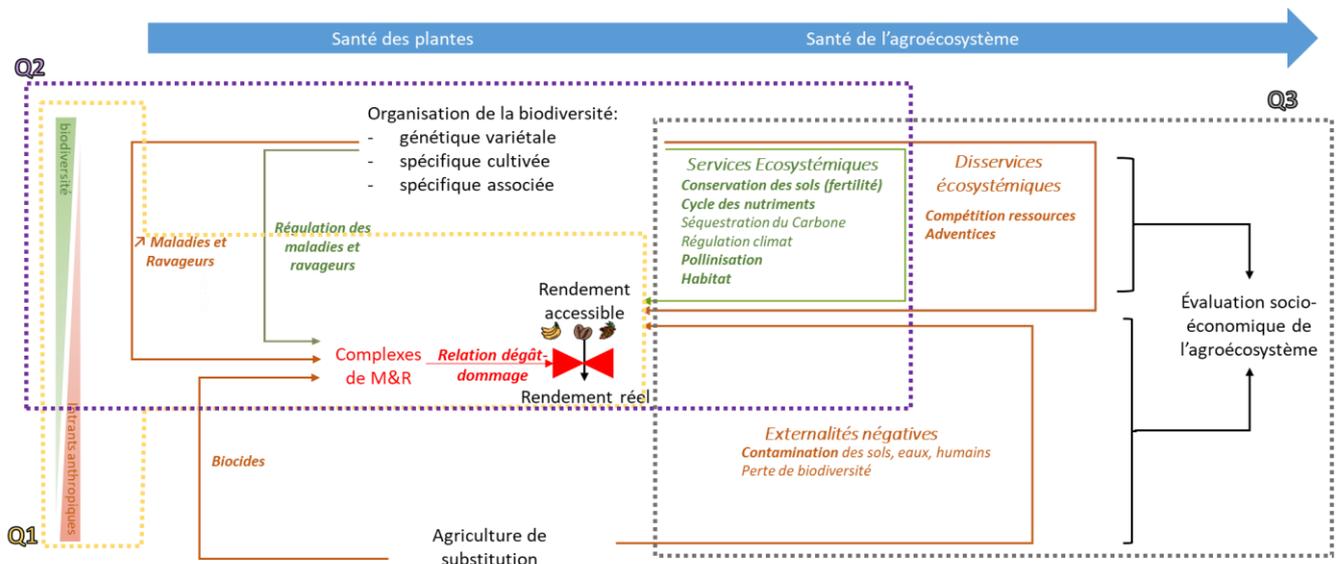
**Q2- Quel est l'effet de l'organisation de la biodiversité (spécifique cultivée, variétale, spécifique associée) sur la régulation des M&R, la santé des plantes cultivées et de l'agroécosystème ?**

Il s'agira ici d'une part d'évaluer l'effet de la complexification des systèmes à base de plantes pérennes sur la régulation des M&R ; et d'analyser les propriétés émergentes dans les systèmes multipest x multiespèces sur le service de régulation. D'autre part je chercherais à identifier les déterminants de la santé des plantes à travers une approche systémique pour prendre en compte les interactions entre composants du système et l'analyse des voies d'actions qui sous-tendent les SE qui soutiennent les rendements accessibles et réels.

**Q3- Comment prendre en compte les compromis entre SE et disservices, et les externalités négatives pour la conception de systèmes plurispécifiques durables ?**

Je m'intéresserais ici au complexe de M&R d'une ou plusieurs espèces cultivées selon la composition du système. Une approche systémique permettra de caractériser les différentes voies d'actions et les interactions entre les différents composants biophysique du système qui aboutissent à la fourniture du service de régulation des M&R. Les autres services écosystémiques d'intérêts pour la conception de systèmes durables (qualité du sol, séquestration de carbone, production (ressources alimentaires), et autre identifiés conjointement avec les producteurs) seront également considérés afin de mettre en évidence d'éventuels compromis avec le service de régulation. En effet, dans un système diversifié, les mécanismes de compétition entre espèces pour les ressources (lumière et nutriments) ainsi que les interactions entre complexes de M&R peuvent aboutir à des effets antagonistes selon le SE considéré. L'objectif sera d'optimiser le service de régulation des M&R en focalisant d'abord sur l'effet de l'organisation spatiale de la strate arborée, mais également des autres plantes pérennes cultivées, tout en prenant en compte la production globale de SE

À une échelle plus large, je souhaiterais intégrer également les DES générées par l'agriculture conventionnelle (contamination des sols et des humains par les pesticides), et je chercherais à mettre en évidence les verrous et les opportunités qu'offrent la diversification pour construire une agriculture garantissant la santé des plantes, des agroécosystèmes et des humains, et à identifier les indicateurs attendus, pertinents et convaincants en termes de SE et DES à prendre en compte pour évaluer ces systèmes et accompagner la transition agroécologique. Des questions d'ordre méthodologiques devront être abordées en lien avec la quantification des DES induits par les pratiques visant à la protection des cultures, de leur impact sur les santés des plantes, des agroécosystèmes et des humains, et l'analyse des compromis entre SE et DES à différentes échelles spatiales (parcelles, bassin versant, territoire).



**Figure 28 : Schéma conceptuel articulant mes différents axes de recherches et les questions associées Q1, Q2 et Q3. Les SE indiqués en gras sont ceux potentiellement impliqués dans l'élaboration du rendement accessible et la régulation des M&R.**

Pour cela je propose d'élargir la diversité prise en compte dans les SAFs en y intégrant la diversité d'espèces cultivées, et la diversité génétique variétale. La complexification d'un gradient de diversité de SAFs à base de deux ou trois espèces (bananier et cacao et/ou café) pose de nombreuses questions, en lien avec la structure et la composition du système, qu'il faudra alors explorer.

Je pense m'appuyer sur différents cadres théoriques et concepts, dont certains ont été déjà éprouvés dans le cas de mes recherches sur les SAFs à base de caféiers, pour construire une approche systémique de la santé des plantes mobilisable dans une logique de co-conception de systèmes diversifiés à base de plantes pérennes. Mes objectifs à long terme sont de :

- 1- Construire une méthode d'analyse « multipest x multiespèce ». (Profils de dégat, relation dégat-dommage, recherche d'indicateur pour construction d'un modèle simple d'estimation des pertes)
- 2- Approfondir l'exploration de la relation entre biodiversité et régulation des M&R
- 3- Créer de la généricité sur les processus identifiés dans les systèmes pérennes tropicaux
- 4- Faire évoluer l'approche systémique pour comprendre les déterminants de la régulation des M&R vers une approche systémique pour comprendre les déterminants de la santé des plantes

Je présenterais par la suite, les différentes pistes que j'envisage de suivre, ou que j'ai commencé à explorer, pour mettre en œuvre ce projet de recherche, en m'appuyant notamment sur le montage de thèse et l'encadrement de doctorants.

### 3.3. ÉTUDE DE LA RELATION DEGAT-DOMMAGE DANS UN GRADIENT DE COMPLEXITE DE SYSTEMES

#### 3.3.1. Développement d'outils méthodologiques pour quantifier les pertes de rendement

Le développement de méthodes et d'outils pour estimer les pertes de rendement liées aux complexes de M&R des cacaoyers et des musacées est une étape préliminaire essentielle pour pouvoir estimer le service de régulation dans des gradients de diversités.

J'ai commencé à explorer cette question sur le complexe de M&R qui affecte les cabosses du cacaoyer dans la région de San Martin en Amazonie péruvienne dans le cadre de la thèse de Marcos Ramos (co-encadrée par Leila Bagny-Beihle de l'UMR PHIM). Dans ce contexte, les trois principales M&R qui impactent la production sont : la Pourriture des cabosses (*Moniliophthora roreri*), la Pourriture noire (*Phytophthora palmivora*), et un lépidoptère foreur des cabosses localement, appelé « mazorquero » (*Carmenta forasemini*). Il s'agit dans ce cas précis de pertes primaires directes, c'est-à-dire que les dégâts affectent directement les cabosses et impact directement le nombre de fèves récoltables. L'estimation des pertes de rendement à l'échelle de l'arbre dépend d'une part du nombre de cabosses produites (un suivi dynamique des cabosses adultes est alors nécessaire), des différentes combinaisons de M&R pouvant affecter une cabosse et qui sont associées chacune à un niveau de perte de fèves données, et du nombre de cabosses par arbre atteintes par une combinaison de M&R donnée. Pour évaluer les pertes, nous avons établi deux paramètres :

- Un indice de dégât à l'échelle de la cabosse ( $SDR_i$  pour « Seed Damage Ratio of a Pest or Disease i ») qui établit le lien entre une combinaison donnée de M&R et leur impact sur les fèves. Nous avons établi trois classes de fèves en fonction de la manière dont les M&R les affectent pour répondre aux enjeux des marchés locaux: les fèves saines (Healthy), les fèves affectées, mais qui peuvent encore être exploitées commercialement (ASR), et les fèves perdues qui ne peuvent pas être exploitées commercialement (DSR). (Figure 29)
- Un profil de dégât à l'échelle de l'arbre qui quantifie le nombre de cabosses affecté par une combinaison donnée de M&R.

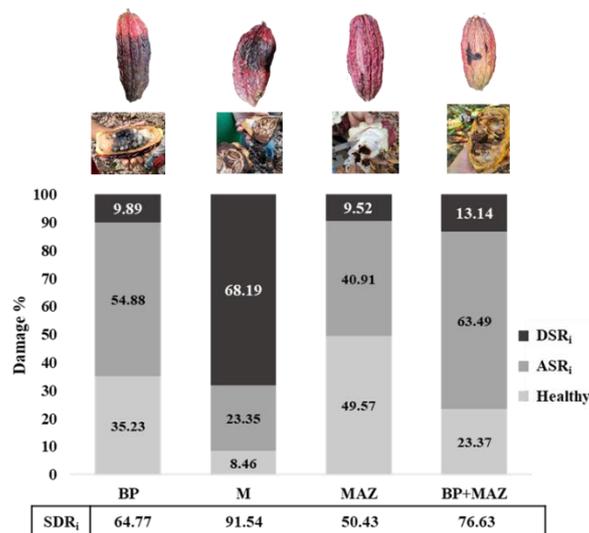


Figure 29 : Indice de dégât par combinaison de M&R : pourriture des cabosses seule (BP), pourriture noire seul (M), mazorquero seul (MAZ) et la combinaison de la pourriture des cabosses et du mazorquero (BP+MAZ). Le résultat est exprimé en pourcentage de perte par rapport au nombre moyen de fèves par cabosse (46) pour chaque combinaison de M&R évaluée.  $SDR_i$  représente la somme des  $DSR_i$  et  $ASR_i$  pour chaque combinaison M&R

Nous avons ensuite pu développer une équation pour la perte de rendement à l'échelle de l'arbre selon l'équation (1) où AP correspond à la quantité totale de cabosses affectées par un profil de dégât donné  $IC_i$ ,  $meanS$  le nombre moyen de fèves par cabosse et  $SDR_i$  l'indice de dégât par combinaison de M&R:

$$Yield\ Loss = \sum_{i=1}^n (AP \times IC_i \times meanS \times SDR_i) \quad (1)$$

Nous avons ensuite pu mobiliser ces résultats et construire un modèle de simulation pour évaluer l'impact de différents scénarii de profils de dégâts sur le revenu des producteurs en fonction des prix d'achat sur les marchés. En effet, les prix varient selon que les semences sont vendues sur le marché formel (bio ou conventionnel) ou informel où les fèves affectées sont achetées au même prix que les fèves saines. Ce modèle simple sera utilisé pour alimenter les discussions avec nos partenaires locaux (Fondation Choba choba, FIBL) avec qui nous sommes en train de construire la suite du projet.

Ces premiers résultats montrent bien la nécessité de développer des outils et méthodes adaptées aux complexes de M&R dans un contexte donné, ici un complexe affectant les cabosses. Il sera nécessaire, le cas échéant, de s'intéresser à d'autres mécanismes de dégâts et d'élaborer des outils adaptés. Évidemment, les connaissances acquises au fur et à mesure des cas d'études permettront d'être plus efficient à chaque nouvelle situation.

Il en sera de même pour quantifier et modéliser les pertes de rendements chez les musacées. Une première étape consistera à élaborer un modèle de relation dégât-dommage en monoculture. Parmi les nombreux M&R du bananier, ceux à l'origine des plus grosses pertes économiques sont : les nématodes endoparasites des racines (*Radopholus similis*, *Pratylenchus coffeae*), le charançon du bananier (*Cosmopolites sordidus*) et la cercosporiose noire (*Mycosphaerella fijiensis*) (Dassou et al., 2023). Mais selon les situations de productions, d'autres M&R mineurs cumulés peuvent aussi entraîner des pertes de rendements significatives. La première étape va consister à évaluer dans une gamme de situations de production, le profil de dégâts occasionnés par le complexe de M&R, puis à mettre en relation ces dégâts avec les dommages (perte de rendement) qu'ils provoquent sur la plante. Ces dégâts peuvent occasionner des pertes directes sur le régime de bananes (par exemple les cochenilles, acariens, chenilles, hannetons, escargots, oiseaux et rats). Mais les dégâts peuvent affecter d'autres organes (feuilles, tige, racines) et les processus physiologiques qui en dépendent (photosynthèse, absorption et transport des flux et des nutriments), provoquant des dommages indirects, comme peuvent provoquer les maladies fongiques, bactériennes ou virales, les nématodes, les charançons et les thrips.

Pour cela, je pourrais m'appuyer sur des bases de données déjà existantes, générées par les collègues de l'UPR GECCO et leurs partenaires (Compagnie Fruitière, CFI), afin de construire un cadre conceptuel puis de le valider par l'utilisation de données contextualisées. Les objectifs seront : 1) de développer des outils méthodologiques pour l'évaluation des dégâts non visibles, affectant le pseudo-tronc et les racines (liés aux charançons et nématodes) ; 2) de modéliser et quantifier les pertes de rendement occasionnées par le complexe de M&R dans le cas ; 3) de rechercher et/ou construire un indicateur de ces pertes, facilement mesurables, proxy du service de régulation des M&R et qui pourra être mobilisé dans une logique d'évaluation et de conception de systèmes. J'envisage de monter un projet de thèse Cifre en 2024 pour renforcer les capacités sur cette problématique.

### 3.3.2. Effet de la diversification sur les profils de M&R et les pertes de rendement associées

Bien que la finalité de mes recherches soit la conception de systèmes mobilisant en même temps plusieurs niveaux de biodiversité, je pense important d'explorer de manière « monofactorielle » l'effet de diversification par rapport aux trois niveaux de biodiversité que j'ai présentée précédemment : la diversité variétale d'une espèce cultivée, la biodiversité associée dans des SAFs particulièrement les arbres d'ombrages, et la diversité d'espèces cultivées (caféier, cacaoyer et musacée, banane et plantain). En effet, l'étude de systèmes plus simple, dans des conditions expérimentales plus contrôlées, permettra de générer des connaissances nécessaires à la compréhension des systèmes plus complexes, mais également à la transformation des systèmes en monocultures.

**Diversité variétale** - Les hypothèses que je souhaite tester ici sont i) qu'il existe au sein des parcelles de la variabilité génétique entre les variétés cultivées notamment en terme de sensibilité/ tolérance à différentes M&R composant le complexe, et que ii) la répartition dans l'espace de cette variabilité peut influencer le profil de dégât et les pertes de rendements associées à l'échelle de la parcelle. La gestion de l'organisation de la diversité pourrait être un levier d'action pour réduire les pertes de rendements associés aux complexes de M&R considérés. Pour cela je compte mettre en place des expérimentations dans des systèmes déjà existants et pour lesquels il existe déjà des données notamment de rendement (mélanges variétaux de bananier et de cacaoyer au CATIE au Costa-Rica), et y réaliser des mesures complémentaires de suivi du complexe de M&R, et des pertes de rendements associées, en y adossant un stage de Master 2. Sur le caféier, les systèmes multivariétaux sont rares. Il était prévu de traiter cette question dans le cadre de la thèse de Patrick Millet (que je co-encadre avec Valérie Poncet de l'UMR DIADE), dans les SAFs Haïtien, mais la collecte de données liées aux M&R n'a pas été possible.

**Diversité d'arbres d'ombrages**- Il est attendu que la présence d'arbres d'ombrage impact fortement les complexes de M&R des espèces cultivées, par les nombreuses voies d'actions que j'ai déjà explicitées, et mises en évidence chez le caféier. Mais ces voies d'actions sont à caractériser pour chaque complexe de M&R. Nous avons commencé à explorer l'effet de la modification du microclimat induit par l'ombrage sur les profils de dégâts du cacaoyer dans le cadre de la thèse de Marcos Ramos (Ramos et al., 2024), ce qui nous a permis de mettre en évidence que le VPD était une variable clé et intégrative pour expliquer les profils de dégâts observés (Figure 30). Cet indicateur, facilement mesurable, pourra être utilisé dans une logique de recherche d'espèces d'arbres d'ombrages adaptées à l'agroforesterie.

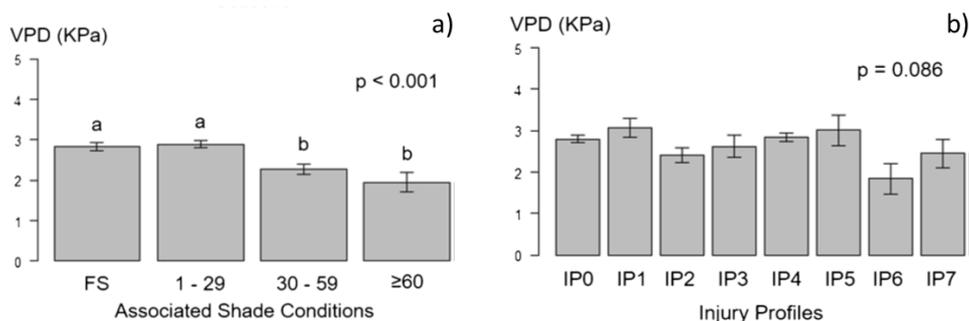


Figure 30 : Représentation du VPDmax moyen a) par conditions d'ombrage associé (classe de % d'ombrage, FS= Full Sun), et b) par profils de dégâts (IP0= no disease ; IP1 = black pod rot ; IP2 = frosty pod rot; IP3 = American cocoa pod borer; IP4= black pod rot + American cocoa pod borer; IP5 = black pod rot + frosty pod rot; IP6 = frosty pod rot + American cocoa pod borer; IP7 = black pod rot + frosty pod rot + American cocoa pod borer (Ramos et al., 2024).

**Diversité d'espèces cultivées** – L'évaluation des complexes de M&R de chaque espèce dans le cas de cultures associées (bananier/cacaoyer, bananier/caféier) a pour but de mettre en évidence les interactions, positives ou négatives, existantes entre les complexes de M&R, selon l'organisation spatiale des deux cultures. Je fais l'hypothèse qu'il est possible d'optimiser l'agencement spatial pour favoriser la régulation globale du système. Pour tester cette hypothèse, je pourrais d'abord réaliser des évaluations dans des systèmes déjà implémentés (en station expérimentale, mais aussi chez des producteurs). Mais à plus long terme, et sur la base de résultats acquis, il serait pertinent de mettre en place des systèmes dédiés pour évaluer de nouveaux prototypes.

### **3.4. EFFETS DE L'ORGANISATION DE LA BIODIVERSITE (SPECIFIQUE CULTIVEE, VARIETALE, SPECIFIQUE ASSOCIEE) SUR LA REGULATION DES M&R, LA SANTE DES PLANTES ET DE L'AGROECOSYSTEME**

Concevoir et piloter des systèmes de culture agroécologique basée sur la mobilisation de la biodiversité et non l'utilisation d'intrants chimiques de synthèse, nécessite la mise en œuvre d'itinéraires techniques dont l'objectif est de favoriser les processus écologiques et donc les fonctions biologiques de l'agroécosystème, comme la régulation des M&R. Afin d'augmenter le service de régulation des M&R au sein des systèmes, il est important de favoriser les interactions, par l'action combinée de différentes pratiques (Meynard, 2017), qui réduisent les pertes de rendements et in fine augmentent la production. Ces pratiques peuvent agir à différents niveaux : directement sur la plante hôte (pratiques de taille ou de fertilisation), sur la biodiversité associée (contrôle de la structure et composition de la strate arborée, contrôle des adventices et de la strate herbacée, contrôle de la fertilité du sol), ou sur le complexe de M&R par l'introduction d'auxiliaires de culture.

L'évaluation de ces pratiques sur la régulation des M&R est rendue difficile de par les nombreuses interactions qui ont lieu dans le système et qui peuvent avoir des effets synergiques ou antagonistes sur la régulation.

Il est donc important de mieux comprendre i) le fonctionnement du système et d'identifier les interactions entre compartiments biologiques qui permettent de réduire l'impact des M&R et ainsi d'améliorer la production et ii) comment les pratiques de gestion de la biodiversité modifient ces interactions.

Les questions auxquelles je tâcherais de répondre dans cet axe de recherche, dans un premier temps sur le modèle cacaoyer, sont:

- 1- Quelles sont les voies d'actions (directes ou indirectes) qui régissent les interactions entre les différents compartiments biologiques ?
- 2- Comment ces voies d'actions affectent-elles la régulation du complexe de M&R ?
- 3- Quelles pratiques de gestion de la biodiversité ont un impact sur ces voies d'actions ?
- 4- Comment améliorer la régulation des maladies et ravageurs par des pratiques adaptées?

#### **3.4.1. Impact de la biodiversité sur la régulation des complexes de M&R et la santé des cacaoyers**

Dans le cadre de la thèse de Marcos Ramos, nous allons chercher à caractériser les voies d'actions directes et indirectes agissant en interactions pour contribuer au final à la régulation des M&R et à la productivité du système. Bien que l'ensemble des composants du système soit en interactions, il est possible d'identifier et de caractériser les principaux compartiments biologiques ayant un impact sur la santé de la plante cultivée et les pertes causées par M&R: la strate arborée, la strate herbacée, le

sol, la plante cultivée, le complexe de M&R (Durand-Bessart et al., 2020). Marcos Ramos a mis en place un réseau de 8 parcelles, dans la vallée du haut Huayabamba (région amazonienne de San Martin au Pérou), dans lesquelles chaque composant du système a été caractérisé par des variables indicatrices, nous permettant de renseigner les potentielles voies d'actions ayant un impact soit sur la régulation des M&R, soit sur le rendement accessible du cacaoyer. En considérant les pertes de rendement comme un proxy du service de régulation, l'idée est de catégoriser les cacaoyers en fonction de leur classe de régulation, puis de rechercher par association statistique, les voies d'actions qui diffèrent selon les classes des cacaoyers. Les composants pourront être étudiés séparément puis à travers une analyse globale permettant de révéler les interactions entre composants à travers une analyse de type réseau (modèle d'équation structurelle), et identifier les voies d'action qui ont des effets synergiques et/ou antagonistes sur le service de régulation des M&R.

Dans un second temps, l'ensemble des cacaoyers et des arbres d'ombrage associés étant spatialisé, nous chercherons à localiser des zones de « bonne santé » et de « mauvaise santé » des cacaoyers (sur la base de leur rendement accessible et de leur perte) pour caractériser l'organisation de la biodiversité dans ces zones contrastées et rechercher les voies d'action qui affectent la santé des cacaoyers, non plus avec une approche cacaoyer centrée, mais par une approche spatiale à l'échelle de la parcelle et sous parcelles (zone de bonne et de mauvaise santé).

Les résultats de ce travail nous permettront de valider les indicateurs que nous avons utilisés pour caractériser les composants du système (arbres d'ombrage, strate herbacée, sol), ainsi que les méthodes d'analyse, qui pourront par la suite être mobilisées et améliorées pour l'étude d'autres systèmes et notamment d'autres modèles biologiques comme le bananier.

### **3.4.2. Analyse des pratiques de pilotage de la santé des plantes dans les SAFs à base de cacaoyer en Côte d'Ivoire**

L'élaboration de pratiques de gestion innovantes doit donc prendre en compte ces combinaisons d'actions et en étudier l'impact sur la dynamique des interactions du système. La formalisation des savoirs relatifs au fonctionnement du système et leur intégration dans un socle de connaissance commun aux différents acteurs de l'innovation sont une étape indispensable pour mettre en œuvre une démarche de co-conception de systèmes innovants (Archibald et al., 2022).

La question de la gestion de la santé est fondamentale pour concevoir des systèmes résilients au M&R, puisque selon l'hypothèse que je défends, la santé des plantes cultivées dépend de l'organisation de la biodiversité au sein de l'agroécosystème, et donc forcément de la manière, dont la biodiversité, est gérée. Dans la logique d'une approche systémique, je considère donc le producteur et ces pratiques de gestion, comme faisant partie intégrante du système. Pour appréhender la gestion comme une relation d'interaction entre un agriculteur et son environnement au moment de mettre en œuvre une pratique, en situation réelle, dans un système complexe, je me suis inspirée d'un cadre théorique développé en ethnologie et mobilisé en science de l'éducation : la méthode d'analyse de l'activité développée dans le cadre du programme de recherche empirique « cours d'action ». Après avoir testé le potentiel d'une telle approche dans le cas de la gestion des SAFs à base de caféier (Durand et al., 2019), je voudrais maintenant le mobiliser et l'intégrer dans une démarche d'analyses des pratiques pour répondre aux questions suivantes :

- Quelle est la diversité des pratiques mises en œuvre pour gérer la santé des plantes chez des agriculteurs appliquant des intrants de synthèse et chez ceux qui n'en appliquent pas ?
- Quelle est la perception et les critères d'évaluation de la santé des plantes des agriculteurs ?

- Comment l'interaction entre pratiques, plantes cultivées, plantes associées et biotope impacte-t-elle la santé des plantes ?
- Quels sont les critères de décision et les signes qui font sens aux agriculteurs pour la mise en œuvre d'une pratique donnée ?
- Comment l'assemblage de ces pratiques dans le temps et dans l'espace peut-il conduire au pilotage d'une santé des plantes améliorée ?

Pour cela j'ai construit un projet de thèse, qui est porté par la doctorante Marie-Thérèse Morrisson (co-encadrée par Martin Notaro de l'UMR ABSys, en poste en Côte d'Ivoire à l'INP-HB, Yamoussoukro, direction, Stéphane de Tourdonnet UMR ABSys), dans lequel nous allons étudier la gestion de la santé des plantes dans les SAFs à base de cacaoyers en Côte d'Ivoire. Cette thèse s'intègre dans le projet « Plant Health » autour duquel c'est fédéré un consortium interdisciplinaire sur la question de la santé des plantes. Dans le cadre de ce projet, je travaille étroitement avec des sociologues et ethnobotanistes (Aurélie Javelle, UMR Innovation, Adou Yao Université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY), dont les travaux menés dans le projet sur la perception de la santé pourront venir éclairer les résultats de la thèse de Marie-Thérèse.

La gestion des SAFs à base de cacaoyer implique un large éventail de pratiques possibles, allant du choix des espèces associées et des variétés cultivées, dans le temps et dans l'espace, à l'utilisation d'intrants chimiques (fertilisation, contrôle des maladies et ravageurs, désherbage), aux pratiques de taille, etc. Les agriculteurs ont différentes façons d'appréhender la santé de leurs agroécosystèmes, les héritages culturels et les expériences agricoles de chaque agriculteur façonnent leurs modes de gestion des agroécosystèmes et les pratiques qui en découlent. Par conséquent, leur choix de pratiques agricoles pour gérer la santé des plantes peut varier, car ils n'ont pas les mêmes critères ou seuils d'indicateurs pour définir un état malade ou sain d'une plante ni les mêmes connaissances sur les actions possibles qu'ils peuvent entreprendre pour la modifier. Ces différentes connaissances sont à ce jour largement méconnues alors qu'une meilleure compréhension de celles-ci permettrait de mieux valoriser les savoirs scientifiques (GIRARD et al., 2016; Toffolini et al., 2016). De plus, l'articulation de ces connaissances constitue une base nécessaire à un processus de co-conception (Prost et al., 2017). Au sein des SAFs à base de cacaoyers, il existe un large gradient biodiversité associée, variable en termes de diversité spécifique comme de répartition spatiale. Par ailleurs, ces SAFs sont gérés par des agriculteurs qui mettent en œuvre des pratiques agricoles distinctes en fonction des connaissances et croyances issues de l'héritage culturel, académique et expérientiel (Toffolini et al., 2016). Cette agrobiodiversité et cette gestion agricole interagissent sur la santé des cacaoyers. Dans le cadre de la thèse de Marie-Thérèse Morrisson, nous allons chercher à mettre en évidence les relations entre (i) les pratiques agricoles (ii) les caractéristiques de l'agrobiodiversité et (iii) la santé des cacaoyers.

La première étape dans cette thèse va consister à établir la relation entre la biodiversité associée aux cacaoyers, les pratiques agricoles et la perception de la santé des cacaoyers par les agriculteurs biologiques et conventionnels. Pour cela Marie-Thérèse réalisera dans un premier temps un diagnostic agronomique afin de caractériser la biodiversité des parcelles, de mettre en évidence une gestion différenciée ainsi que la perception et les critères d'évaluation de la santé des cacaoyers utilisés par les agriculteurs. Ensuite, elle analysera les pratiques des agriculteurs à travers la méthode d'analyse de l'activité qui permettra de révéler les indicateurs et les signes qui font sens et déclenchent l'action des agriculteurs. Pour finir, il sera question d'évaluer la santé des cacaoyers et d'identifier les pratiques de gestion associées à des systèmes dont les cacaoyers sont en « bonne santé ».

### 3.5. ÉVALUATION DES COMPROMIS ENTRE SERVICES ET DISSERVICES ECOSYSTEMIQUES POUR LA CONCEPTION DE SYSTEMES PLURISPECIFIQUES DURABLES

#### 3.5.1. Effet de la diversité végétale associée sur la fourniture de services écosystémiques au sein des systèmes agroforestiers à base bananiers et caféiers au Laos : modélisation et optimisation des compromis entre services pour la conception de systèmes de culture

La conception de SAFs optimisés nécessite de bien comprendre les compromis entre SE et DSE, notamment dans le partage des ressources hydrominérales et la régulation des M&R (Poeydebat et al., 2016), mais aussi sur la fertilité et le stockage de carbone dans le sol ou la préservation de la biodiversité (Vaast and Somarriba, 2014). La composition spécifique de ces systèmes (espèces ou groupes fonctionnels) ainsi que leur agencement dans le temps et dans l'espace sont autant de moyens pour maximiser les services. Il s'agit bien de maximiser le rôle multifonctionnel des arbres associés aux SAFs (Tscharntke et al., 2011).

Au Laos, il y a actuellement le développement de SAFs à base de bananiers et de caféiers en réponse aux problèmes de durabilité des 'cash-crops' qui sont produites de manière intensive (Fujisao et al., 2020) ou comme voie de développement de l'agriculture dans les zones les plus pauvres (van Der Meer Simo et al., 2020). Dans ce contexte de développement de nouveaux systèmes, il est essentiel de comprendre comment agencer les deux espèces centrales dans ces systèmes avec les autres espèces des strates hautes et basses pour maximiser les services aux agriculteurs. En termes méthodologiques, le développement d'outils prédictifs (utilisables pour la conception) de l'effet de l'organisation spatiale sur la production de multiples services reste un challenge (Luedeling et al., 2016). Les approches statistiques reliant la structure des SAF à leurs performances (Saj et al., 2023; Salazar-Díaz and Tixier, 2021) pourraient ainsi être étendues à une approche multiservice.

Pour aborder cette problématique, j'ai participé au montage d'une thèse (dirigée par Philippe Tixier de l'UPR GECCO, et co-encadrée par Benoit Duong de UMR ABSys et moi-même) qui doit commencer fin 2024, et s'appuiera sur le projet PRCC-CN (AFD) impliquant les chercheurs du Centre de protection des cultures du Département de l'Agriculture et des étudiants de master issus de l'Université Nationale du Laos (partenariat avec le Dr Phouthason SIBOUNNVONG du département de Protection des cultures en développement).

L'objectif de cette thèse est de comprendre et modéliser l'effet de la composition spécifique et l'organisation spatiale des plantes associées (strates hautes et basses) sur la fourniture de SE au sein des SAFs à base de bananiers et caféiers au Laos. Cela comprendra la quantification et la modélisation des compromis entre les services de régulation des M&R, de production, de stockage de carbone et de maintien de la biodiversité. En termes méthodologiques, il s'agira de concevoir un cadre de modélisation prédictif de ces relations qui puisse être utilisable pour la conception de SAFs.

Les questions de recherches principales seront :

- Comment la composition et l'organisation spatiale de la biodiversité associée (principalement arbres d'ombrage) dans les SAFs déterminent-elles la fourniture de SE ?
- Quels compromis existe-t-il entre les différents SE au sein du système ?
- Comment prendre en compte ces compromis pour améliorer la production et la rentabilité économique du système via une organisation de la biodiversité optimale ?

Pour répondre à ces questions, nous proposons de développer une approche systémique basée sur l'étude d'un réseau de parcelles représentatif d'un gradient de diversité des SAFs présents dans le nord du Laos. La méthodologie comporte deux étapes principales.

D'une part nous chercherons à caractériser l'organisation de la biodiversité (composition, structure, description fonctionnelle) dans les SAFs. De manière similaire aux travaux Salazar-Díaz & Tixier (2021) dans chaque parcelle étudiée, un protocole « plante centrée » sera mis en place afin de mesurer : 1) Les services qui y sont associés (production, régulation des M&R (sur bananiers et caféiers), stockage potentiel de C, préservation de biodiversité végétale. 2) La composition (spécifique et fonctionnelle) et la structure spatiale de la communauté végétale autour de chaque plante. 3) Une analyse socio-économique simplifiée (intrants/travail/vente).

D'autre part nous modéliserons et analyserons des compromis entre SE afin d'optimiser la production via une organisation spatiale de la diversité adéquate. L'approche de modélisation envisagée repose sur l'utilisation de modèles d'équation structurels (SEM) afin de lier variables descriptives de la communauté végétale, de variables d'états du système, et enfin des services. En supplément de ce modèle sera couplé à un module économique simple (déjà existant au Vietnam et à paramétrer dans le cas des systèmes étudiés). Enfin, cet outil sera utilisé pour explorer les scénarios d'agencement des plantes et en tirer des enseignements utiles pour la conception de SAFs optimisés au regard des objectifs des agriculteurs.

Cette thèse nous permettra d'acquérir de nouvelles connaissances sur le fonctionnement des SAFs au Laos, en proposant un cadre revisité de modélisation de la relation communauté/services, par une approche intégrée de l'étude des compromis entre services, notamment au regard des performances agronomiques et socio-économiques de ces systèmes.

### **3.5.2. Quantification des SE et DES dans un gradient de gestion de pratiques (Biodiversité vs intrant anthropique)**

À plus long terme, et pour faire suite aux travaux de thèse de Marie-Thérèse Morrisson en Côte d'Ivoire qui s'intègre dans un projet plus large, le projet santé des plantes, je souhaiterais construire un projet intégrant la prise en compte des DES en termes d'externalités négatives liées à l'utilisation des pesticides en agriculture conventionnelle. Le consortium interdisciplinaire qui s'est construit autour du projet santé des plantes et particulièrement dans les activités en Côte d'Ivoire implique des chercheurs en sciences sociales ainsi que des agronomes. Je souhaiterais intégrer dans cette dynamique des chercheurs en biogéochimie et spécialistes de la contamination des sols agricoles et pourquoi pas des équipes de médecins pour évaluer avec la santé des agroécosystèmes et la santé humaine. Des appels à projets en ce sens commencent à émerger, particulièrement dans le cadre d'approche « one health ». (Fonds Français pour l'Environnement Mondial (FFEM), ecophyto II). Il existe également dans le cadre du programme exposUM, un appel à projets pour le financement de plusieurs thèses menées en parallèle dans une logique d'interdisciplinarité. De telles sources de financement me permettraient de porter ma vision intégrative et interdisciplinaire à travers le montage de projets et de thèse en mobilisant les connaissances et les méthodologies déjà acquises, et d'en construire de nouvelles pour aller plus loin dans la conception de SAFs durables.

### 3.6. DEMARCHE DE FORMATION A ET PAR LA RECHERCHE

L'accompagnement des thèses et des mémoires de recherche et les conditions de formation des futurs chercheurs sont l'occasion de réfléchir à la formation à/par la recherche. Cela s'applique évidemment aux étudiants de doctorats et de Master 2, mais également en amont dans le cursus universitaire.

Il est question de transmettre, de former et d'encadrer, mais il est surtout question pour moi d'accompagner, de stimuler et de révéler.

Dans mon rapport à l'apprentissage, en tant qu'encadrante, j'essaye au maximum de promouvoir l'apprentissage autonome, et cherche à accompagner la réflexion critique et le dialogue constructif avec les étudiants. Je pense que dans un processus de recherche, il faut stimuler et encourager la créativité, tout en développant le raisonnement hypothético-déductif des étudiants. Leurs dynamismes, leurs motivations, leurs connaissances et leurs visions perpétuellement « remise à jour », sont pour moi une source inépuisable d'inspiration, et l'enjeu pour moi, en tant que formateur, est de promouvoir un apprentissage profond, significatif et autonome chez les étudiants, tout en développant leur capacité à penser de manière critique et créative.

Je me positionne en cela dans une approche maïeutique, qui consiste à aider l'étudiant à mobiliser ou construire ses propres connaissances et à les exprimer de manière claire et cohérente. Ainsi, mes objectifs lorsque j'encadre un étudiant sont de :

- Créer un environnement propice au dialogue: j'essaye de favoriser un environnement où les étudiants se sentent en sécurité pour exprimer leurs idées et opinions sans crainte de jugement. Encouragez le respect mutuel et la collaboration avec les étudiants.
- Poser des questions ouvertes et réflexives, et éviter de donner des réponses toutes faites: j'évite les questions fermées qui nécessitent une simple réponse par "oui" ou "non", et au lieu de fournir des réponses directes aux questions, j'essaye de guider les étudiants à travers un processus de réflexion qui leur permet de découvrir les réponses par eux-mêmes. Par exemple lorsque j'apporte des corrections, je soulève le problème lorsqu'il y en a un, sans y apporter de solutions moi-même afin d'amener les étudiants à réfléchir, à explorer et à approfondir leur compréhension du sujet et acquérir des compétences nouvelles (rédaction d'articles en anglais, analyses de résultats, etc.).
- Écouter activement: En tant qu'encadrante, je pense que l'écoute attentivement est primordiale, et je montre un réel intérêt pour leurs idées. J'essaye au maximum d'intégrer les étudiants dans la réflexion le plus tôt possible dans les sujets que je propose.
- Stimuler la pensée critique et l'éthique: je pense qu'il est fondamental d'encourager les étudiants à remettre en question leurs propres croyances et à considérer différentes perspectives. J'essaye de poser des questions qui les amènent à évaluer les arguments, à analyser les preuves et à tirer des conclusions logiques de leurs travaux de recherches, qui se doivent d'être objectifs.
- Favoriser l'autonomie: pour encourager les étudiants à prendre en charge leur propre apprentissage, je considère que mon rôle est de les guider à travers un processus d'exploration et de découverte où ils sont actifs dans la construction de leur compréhension.
- Favoriser les collaborations et le travail en équipe : Je pense qu'un travail de recherche se doit d'être mené en équipe, dans laquelle chaque collaborateur a un rôle, sans jamais

considérer que l'un est plus important qu'un autre. La confiance et le respect mutuel sont un facteur clé pour l'émergence d'une intelligence collective.

- Stimuler le dialogue et la discussion : pour favoriser un environnement d'apprentissage collaboratif où les étudiants peuvent partager leurs perspectives et construire leur compréhension ensemble, j'encourage les échanges d'idées entre les étudiants.

J'ai toujours pensé que chaque personne est la mieux placée pour savoir ce qui lui convient et je laisse libre aux étudiants de prendre en compte mes conseils ou pas. Je mets mon niveau d'engagement dans l'accompagnement des étudiants est à la hauteur de leur demande, et dans la mesure où j'ai une véritable appétence pour la transmission, j'éprouve une profonde satisfaction à voir aboutir le travail des étudiants que j'encadre. C'est d'ailleurs aujourd'hui, ma motivation la plus profonde dans la recherche, et particulièrement la formation d'étudiants issus des pays où je mène mes projets. La formation par et pour la recherche représente pour moi un levier majeur du développement, et je mets un point d'honneur à construire des collaborations solides avec les universités partenaires, par le biais des étudiants de doctorats que j'encadre, comme celles du CATIE au Costa-Rica, de Quisqueya en Haïti ou l'INPHB en Côte d'Ivoire. Ma priorité est avant tout d'accompagner les étudiants, sans qui aucun des travaux que j'ai présentés dans ce mémoire n'aurait vu le jour. Je fais passer leurs besoins avant le mien, notamment dans le processus de publication, ce qui, avec un temps dédié à la rédaction d'articles limités, m'a conduit à peu publier en première auteure, et cela m'importe peu, puisque j'ai la satisfaction de voir émerger de nouveaux jeunes chercheurs.

#### 4. BIBLIOGRAPHIE

---

2019. Enveritas.
2021. The coffee guide. International Trade Centre, Geneva.
- Aboah, J. and Setsoafia, E.D., 2022. Examining the synergistic effect of cocoa-plantain intercropping system on gross margin: A system dynamics modelling approach. *Agricultural Systems*, 195: 103301.
- Allinne, C. et al., 2019. Régulation des bioagresseurs du caféier par le couvert arboré au Costa Rica. In: H.J.-M. Seghieri Josiane (Editor), *Agroforesterie et services écosystémiques en zone tropicale : Recherche de compromis entre services d'approvisionnement et autres services*. Update sciences et technologies. Ed. Quae, Versailles, France, pp. 53-61.
- Altieri, M., 1999. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 74: 19-31.
- Ango, T.G., Börjeson, L., Senbeta, F. and Hylander, K., 2014. Balancing ecosystem services and disservices: smallholder farmers' use and management of forest and trees in an agricultural landscape in southwestern Ethiopia. *Ecology and Society*, 19(1).
- Anthony, F., Bertrand, B., Etienne, H. and Lashermes, P., 2011. *Coffea and Psilanthus*. In: C. Kole (Editor), *Wild Crop Relatives: Genomic and Breeding Resources: Plantation and Ornamental Crops*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 41-61.
- Archibald, S., Allinne, C., Cerdán, C.R. and Isaac, M.E., 2022. From the ground up: Patterns and perceptions of herbaceous diversity in organic coffee agroecosystems. *Ecological Solutions and Evidence*, 3(3): e12166.
- Aristizabal, N. and Metzger, J.P., 2019. Landscape structure regulates pest control provided by ants in sun coffee farms. *Journal of Applied Ecology*, 56(1): 21-30.
- Assessment, M.E., 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC.
- Aubertot, J.-N. and Robin, M.-H., 2013. Injury Profile SIMulator, a Qualitative Aggregative Modelling Framework to Predict Crop Injury Profile as a Function of Cropping Practices, and the Abiotic and Biotic Environment. I. Conceptual Bases. *PLoS One*, 8(9): e73202.
- Aubertot, J.N. et al., 2007. Stratégies de protection des cultures. In: Quae (Editor), *Pesticides, agriculture et environnement*.
- Autret, B. et al., 2013. Las prácticas de los productores orgánicos como fuente de innovación para manejar las plagas y enfermedades de café. 40° Aniversario Territorios Climáticamente Inteligentes en el Trópico. CIRAD, Montpellier, 1 p. pp.
- Avelino, J., Allinne, C., Cerda, R., Willocquet, L. and Savary, S., 2018. Multiple-Disease System in Coffee: From Crop Loss Assessment to Sustainable Management. *Annual Review of Phytopathology*, 56(1): null.
- Avelino, J. et al., 2007. Topography and crop management are key factors for the development of american leaf spot epidemics on coffee in Costa Rica. *Phytopathology*, 97(12): 1532-1542.
- Avelino, J. et al., 2015. The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008–2013): impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food Security*, 7(2): 303-321.
- Avelino, J., Willocquet, L. and Savary, S., 2004. Effects of crop management patterns on coffee rust epidemics. *Plant Pathology*, 53: 541–547.
- Avelino, J. et al., 2006. The intensity of a coffee rust epidemic is dependent on production situations. *Ecological Modelling*, 197(3-4): 431-447.
- Bagny-Beilhe, L. et al., 2020. Pest-regulating networks of the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) in agroforestry systems. *Crop Protection*, 131: 10 p.
- Bedimo, J.A.M. et al., 2008. Effect of Shade on Arabica Coffee Berry Disease Development: Toward an Agroforestry System to Reduce Disease Impact. *Phytopathology*, 98(12): 1320-1325.
- Beer, J., Muschler, R., Kass, D. and Somarriba, E., 1997. Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems* 38: 26.

- Boreux, V., Kushalappa, C.G., Vaast, P. and Ghazoul, J., 2013. Interactive effects among ecosystem services and management practices on crop production: pollination in coffee agroforestry systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(21): 8387-8392.
- Boshier, D., Salvado, J. and Detlefsen, G., 2009. Mesoamerican tree species: a source book for farm planting and ecological restoration. Final Technical Report.
- Boudrot, A. et al., 2016. Shade effects on the dispersal of airborne *Hemileia vastatrix* uredospores. *Phytopathology*, 106: 572-580.
- Brenda B, L., 2007. Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology*, 144(1-2): 85-94.
- Bunn, C., Läderach, P., Ovalle Rivera, O. and Kirschke, D., 2015. A bitter cup: climate change profile of global production of Arabica and Robusta coffee. *Climatic Change*, 129(1): 89-101.
- Campanha, M. et al., 2004. Growth and yield of coffee plants in agroforestry and monoculture systems in Minas Gerais, Brazil. *Agroforestry Systems*, 63(1): 75-82.
- Campos, V., Villain, L., Luc, M., Sikora, R. and Bridge, J., 2005. Plant parasitic nematodes in subtropical and tropical agriculture. Wallingford: CAB International.
- Cannell, M.G.R., 1985. Physiology of the Coffee Crop. In: M.N. Clifford and K.C. Willson (Editors), *Coffee: Botany, Biochemistry and Production of Beans and Beverage*. Springer US, Boston, MA, pp. 108-134.
- Cerda, R. et al., 2016. Effects of shade, altitude and management on multiple ecosystem services in coffee agroecosystems. *European Journal of Agronomy*.
- Cerda, R. et al., 2017. Effects of shade, altitude and management on multiple ecosystem services in coffee agroecosystems. *European Journal of Agronomy*, 82: 308-319.
- Cerda, R. et al., 2015a. Ecosystem services provided by coffee agroecosystems across a range of topoclimatic conditions and management strategies, 5th International Symposium for Farming Systems Design Montpellier, France, pp. 447-448.
- Cerda, R. et al., 2015b. Modeling attainable yield and yield losses due to pests and diseases to compare performances of coffee farming systems, 5th International Symposium for Farming Systems Design Montpellier, France, pp. 127-128.
- Cerda, R. et al., 2020. Coffee agroforestry systems capable of reducing disease-induced yield and economic losses while providing multiple ecosystem services. *Crop Protection*: 105149.
- Cerdán, C.R., Rebolledo, M.C., Soto, G., Rapidel, B. and Sinclair, F.L., 2012. Local knowledge of impacts of tree cover on ecosystem services in smallholder coffee production systems. *Agricultural Systems*, 110(Supplement C): 119-130.
- Charbonnier, F. et al., 2017. Increased light-use efficiency sustains net primary productivity of shaded coffee plants in agroforestry system. *Plant Cell Environ*, 40(8): 1592-1608.
- Chen, Z. et al., 2003. Heat shock-induced susceptibility of green coffee leaves and berries to *Colletotrichum gloeosporioides* and its association to PR and hsp70 gene expression. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 63(4): 181-190.
- Chiarappa, L., 1971. Crop loss assessment methods.
- Cook, R.J., 2000. Advances in plant health management in the twentieth century. *Annual review of phytopathology*, 38(1): 95-116.
- Cooke, B.M., 2006. Disease assessment and yield loss. In: B.M. Cooke, D.G. Jones and B. Kaye (Editors), *The Epidemiology of Plant Diseases*. Springer Netherlands, pp. 43-80.
- DaMatta, F.M., 2004. Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: a review. *Field Crops Research*, 86(2-3): 99-114.
- Damatta, F.M., Ronchi, C.P., Maestri, M. and Barro, R.S., 2007. Ecophysiology of coffee growth and production. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 19(4): 26.
- Damon, A., 2000. A review of the biology and control of the coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Coleoptera : Scolytidae), 90. Cambridge University Press, Cambridge, ROYAUME-UNI.
- Dardonville, M., Bockstaller, C. and Therond, O., 2021. Review of quantitative evaluations of the resilience, vulnerability, robustness and adaptive capacity of temperate agricultural systems. *Journal of Cleaner Production*, 286: 125456.

- Dassou, A.G., Tovignan, S., Vodouhè, F. and Vodouhè, S.D., 2023. Meta-analysis of agroecological technologies and practices in the sustainable management of banana pests and diseases. *Environment, Development and Sustainability*: 1-18.
- De Wit, C.T. and Penning de Vries, F.W.T., 1982. L'analyse des systèmes de production primaires. In: F.W.T.D. Penning de Vries, M.A. (Editor), *La productivité des pâturages sahéliens: Une étude des sols, des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle*, Wageningen (Netherlands), pp. 275-283.
- Deguine, J.-P. et al., 2023. Agroecological crop protection for sustainable agriculture. *Advances in Agronomy*, 178: 1-59.
- Deguine Jean-Philippe, G.C., Laurent Philippe, Ratnadass Alain, Aubertot Jean-Noël, 2016. *Protection agroécologique des cultures*. Versailles, 288 pp.
- Deheuvels, O., Avelino, J., Somarriba, E. and Malezieux, E., 2012. Vegetation structure and productivity in cocoa-based agroforestry systems in Talamanca, Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 149(0): 181-188.
- Díaz, S. et al., 2018. Assessing nature's contributions to people. *Science*, 359(6373): 270-272.
- Döring, T.F., Pautasso, M., Finckh, M.R. and Wolfe, M., 2012. Concepts of plant health—reviewing and challenging the foundations of plant protection. *Plant Pathology*, 61(1): 1-15.
- Dow Goldman, E., Weisse, M., Harris, N. and Schneider, M., 2020. *Estimating the Role of Seven Commodities in Agriculture-Linked Deforestation: Oil Palm, Soy, Cattle, Wood Fiber, Cocoa, Coffee, and Rubber*. WRIPUB.
- Duong, B. et al., 2020. Coffee microbiota and its potential use in sustainable crop management. A review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4: 607935.
- Dupont, S. et al., 2022. Wind-flow dynamics and spore-like particle dispersal over agroforestry systems: Impact of the tree density distribution. *Agricultural and Forest Meteorology*, 327: 109214.
- Durand-Bessart, C. et al., 2020. Analysis of interactions amongst shade trees, coffee foliar diseases and coffee yield in multistrata agroforestry systems. *Crop Protection*, 133: 105137.
- Durand, L. et al., 2019. Activity analysis of coffee growers in complex agroforestry systems, understanding the farmers' practices. In: G.M.L.G. Dupraz Christian (Editor), *World Congress on Agroforestry*. CIRAD, Montpellier, France, pp. 320.
- Duru, M. et al., 2015. How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(4): 1259-1281.
- Elevitch, C., Mazaroli, D. and Ragone, D., 2018. Agroforestry standards for regenerative agriculture. *Sustainability*, 10(9): 3337.
- Fao, 2022. *Crops and livestock products (Production)*. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. Extracted from: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Data of Access: 16-12-2022, FAO.
- Freitas, R. et al., 2013. *Colletotrichum boninense* causing anthracnose on coffee trees in Brazil. *Plant Disease*, 97(9): 1255-1255.
- Fujisao, K. et al., 2020. Impacts of the continuous maize cultivation on soil properties in Sainyabuli province, Laos. *Scientific Reports*, 10(1): 11231.
- Gagliardi, S., Avelino, J., Bagny-Beilhe, L. and Isaac, M.E., 2020. Contribution of shade trees to wind dynamics and pathogen dispersal on the edge of coffee agroforestry systems: A functional traits approach. *Crop Protection*, 130: 8 p.
- Gagliardi, S., Avelino, J., Virginio Filho, E.d.M. and Isaac, M.E., 2021. Shade tree traits and microclimate modifications: Implications for pathogen management in biodiverse coffee agroforests. *Biotropica*, 53(5): 1356-1367.
- GIRARD, C.F.-N., JANKOSWKI, F.G.-F., MARTIN, L.L.-P., PROST, L. and VERTES, F., 2016. Produire et mobiliser différentes formes de connaissances pour et sur la transformation des systèmes agricoles: regards interdisciplinaires.
- Gómez-Delgado, F. et al., 2011. Modelling the hydrological behaviour of a coffee agroforestry basin in Costa Rica. *Hydrology and earth system sciences*, 15(1): 369-392.

- Granados Montero, M.d.M., 2015. Estudio de la epidemiología y alternativas de manejo agroecológico del ojo de gallo (*Mycena citricolor*) en café bajo sistema agroforestales en Costa-Rica, Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio.
- Grijalva, A., 2006. Flora útil etnobotánica de Nicaragua. Managua: Gobierno de Nicaragua, Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales.
- Guerreiro Filho, O., 2006. Coffee leaf miner resistance. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 18: 109-117.
- Häger, A., 2012. The effects of management and plant diversity on carbon storage in coffee agroforestry systems in Costa Rica. *Agroforestry systems*, 86(2): 159-174.
- Haggar, J. et al., 2011. Coffee agroecosystem performance under full sun, shade, conventional and organic management regimes in Central America. *Agroforestry Systems*, 82(3): 285-301.
- Hairiah, K. et al., 2006. Litter layer residence time in forest and coffee agroforestry systems in Sumberjaya, West Lampung. *Forest ecology and management*, 224(1-2): 45-57.
- Hassani, M., Durán, P. and Hacquard, S., 2018. Microbial interactions within the plant holobiont. *Microbiome* 6 (1): 58.
- Hooper, D.U. et al., 2005. EFFECTS OF BIODIVERSITY ON ECOSYSTEM FUNCTIONING: A CONSENSUS OF CURRENT KNOWLEDGE. *Ecological Monographs*, 75(1): 3-35.
- Hoyle, R.H., 2012. Handbook of structural equation modeling. Guilford press.
- Ico, 2019. International Coffee Organization Statistics, International Coffee Organisation.
- ICO, I.C.O., 2018. Historical data on the global coffee trade. International Coffee Organization-Historical Data on the Global Coffee Trade (ico.org).
- International Trade, C., 2021. The Coffee Guide, Fourth Edition | ITC.
- Jackson, D., Skillman, J. and Vandermeer, J., 2012. Indirect biological control of the coffee leaf rust, *Hemileia vastatrix*, by the entomogenous fungus *Lecanicillium lecanii* in a complex coffee agroecosystem. *Biological Control*, 61(1): 89-97.
- Jaramillo, J. et al., 2011. Some Like It Hot: The Influence and Implications of Climate Change on Coffee Berry Borer (*Hypothenemus hampei*) and Coffee Production in East Africa. *PLOS ONE*, 6(9): e24528.
- Jawo, T.O., Kyereh, D. and Lojka, B., 2022. The impact of climate change on coffee production of small farmers and their adaptation strategies: a review. *Climate and Development*, 0(0): 1-17.
- Jose, S., 2009. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforestry Systems*, 76(1): 1-10.
- Jose, S. and Bardhan, S., 2012. Agroforestry for biomass production and carbon sequestration: an overview. *Agroforestry systems*, 86: 105-111.
- Karp, D.S. et al., 2013. Forest bolsters bird abundance, pest control and coffee yield. *Ecology Letters*, 16(11): 1339-1347.
- Kath, J. et al., 2022. Vapour pressure deficit determines critical thresholds for global coffee production under climate change. *Nat Food*: 1-10.
- Kutywayo, D., Chemura, A., Kusena, W., Chidoko, P. and Mahoya, C., 2013. The Impact of Climate Change on the Potential Distribution of Agricultural Pests: The Case of the Coffee White Stem Borer (*Monochamus leuconotus* P.) in Zimbabwe. *PLOS ONE*, 8(8): e73432.
- Lançon, J. et al., 2007. An improved methodology for integrated crop management systems. *Agron. Sustain. Dev.*, 27(2): 101-110.
- Lashermes, P. et al., 1999. Molecular characterisation and origin of the *Coffea arabica* L. genome. *Molecular and General Genetics MGG*, 261(2): 259-266.
- Leandro-Munoz, M.E. et al., 2017. Effects of microclimatic variables on the symptoms and signs onset of *Moniliophthora roreri*, causal agent of *Moniliophthora* pod rot in cacao. *PLoS One*, 12(10): e0184638.
- Lindström, B. and Eriksson, M., 2005. Salutogenesis. *Journal of Epidemiology & Community Health*, 59(6): 440-442.

- Locatelli, B., Imbach, P., Vignola, R., Metzger, M.J. and Hidalgo, E.J.L., 2011. Ecosystem services and hydroelectricity in Central America: modelling service flows with fuzzy logic and expert knowledge. *Reg Environ Change*, 11: 393-404.
- Lomelí-Flores, J.R., Barrera, J.F. and Bernal, J.S., 2010. Impacts of weather, shade cover and elevation on coffee leafminer *Leucoptera coffeella* (Lepidoptera: Lyonetiidae) population dynamics and natural enemies. *Crop Protection*, 29(9): 1039-1048.
- López-Bravo, D.F., Virginio-Filho, E.d.M. and Avelino, J., 2012. Shade is conducive to coffee rust as compared to full sun exposure under standardized fruit load conditions. *Crop Protection*, 38(0): 21-29.
- Loreau, M. et al., 2021. Biodiversity as insurance: from concept to measurement and application. *Biological Reviews*, 96(5): 2333-2354.
- Luedeling, E. et al., 2016. Field-scale modeling of tree–crop interactions: Challenges and development needs. *Agricultural Systems*, 142: 51-69.
- Malézieux, E., 2012. Designing cropping systems from nature. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(1): 15-29.
- Malézieux, E. et al., 2009. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1): 43-62.
- Martin-Breen, P. and Anderies, J.M., 2011. Resilience: A literature review. Sponsored by Rockefeller Foundation, September.
- Merle, I., Tixier, P., de Melo Virginio Filho, E., Cilas, C. and Avelino, J., 2020. Forecast models of coffee leaf rust symptoms and signs based on identified microclimatic combinations in coffee-based agroforestry systems in Costa Rica. *Crop Protection*, 130: 15 p.
- Meunier, C. et al., 2022. A modelling chain combining soft and hard models to assess a bundle of ecosystem services provided by a diversity of cereal-legume intercrops. *European Journal of Agronomy*, 132: 126412.
- Meylan, L., 2012. Design of cropping systems combining production and ecosystem services: developing a methodology combining numerical modeling and participation of farmers : application to coffee-based agroforestry in Costa Rica. Thèse Thesis, Montpellier SupAgro Centre international d'études supérieures en sciences agronomiques, Montpellier, France, 153 pp.
- Meynard, J.-M., 2017. L'agroécologie, un nouveau rapport aux savoirs et à l'innovation. *OCL*, 24(3): D303.
- Meynard, J.-M., Doré, T. and Habib, R., 2001. L'évaluation et la conception de systèmes de culture pour une agriculture durable. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 87(4): 223-236.
- Mittelmark, M.B. et al., 2022. The handbook of salutogenesis.
- Mokondoko, P., Avila-Foucat, V.S. and Galeana-Pizaña, J.M., 2022. Biophysical drivers of yield gaps and ecosystem services across different coffee-based agroforestry management types: A global meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 337: 108024.
- Motisi, N., Ribeyre, F. and Poggi, S., 2019. Coffee tree architecture and its interactions with microclimates drive the dynamics of coffee berry disease in coffee trees. *Scientific Reports*, 9.
- Muller, R.A., Berry, D., Avelino, J. and Bieysse, D., 2009. Coffee diseases. In: J.-N. Wintgens (Editor), *Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production: A Guidebook for Growers, Processors, Traders, and Researchers*. Wiley-VCH, pp. 495-549.
- Muschler, R., 2009. Shade management and its effect on coffee growth and quality, *Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production: A Guidebook for Growers, Processors, Traders, and Researchers*. Wiley-VCH, pp. 395-422.
- Muschler, R.G., 2001. Shade improves coffee quality in a sub-optimal coffee-zone of Costa Rica. *Agroforestry Systems*, 51(2): 131-139.
- Muschler, R.G., 2016. Agroforestry: Essential for Sustainable and Climate-Smart Land Use? In: L. Pancel and M. Köhl (Editors), *Tropical Forestry Handbook*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 2013-2116.

- Nelson, E. et al., 2009. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(1): 4-11.
- Ngo Bieng, M.A., Alem, L., Curtet, C. and Tixier, P., 2017. Tree spacing impacts the individual incidence of *Moniliophthora roreri* disease in cacao agroforests. *Pest management science*, 73(11): 2386-2392.
- Nutter, F.W., Teng, P.S. and Royer, M.H., 1993. Terms and concepts for yields, crop loss, and disease thresholds, 77. American Phytopathological Society, St. Paul, MN, ETATS-UNIS.
- Oerke, E.-C., 2006. Crop losses to pests. *The Journal of Agricultural Science*, 144(01): 31-43.
- Ostrom, E., 2009. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, 325(5939): 419-422.
- Perfecto, I., Vandermeer, J., Mas, A. and Pinto, L.S., 2005. Biodiversity, yield, and shade coffee certification. *Ecological Economics*, 54(4): 435-446.
- Pham, Y., Reardon-Smith, K., Mushtaq, S. and Cockfield, G., 2019. The impact of climate change and variability on coffee production: a systematic review. *Climatic Change*, 156(4): 609-630.
- Philpott, S.M. and Armbrecht, I., 2006. Biodiversity in tropical agroforests and the ecological role of ants and ant diversity in predatory function. *Ecological entomology*, 31(4): 369-377.
- Philpott, S.M., Perfecto, I. and Vandermeer, J., 2008. Behavioral Diversity of Predatory Arboreal Ants in Coffee Agroecosystems. *Environmental Entomology*, 37(1): 181-191.
- Poeydebat, C., Carval, D., de Lapeyre de Bellaire, L. and Tixier, P., 2016. Balancing competition for resources with multiple pest regulation in diversified agroecosystems: a process-based approach to reconcile diversification and productivity. *Ecology and Evolution*, 6(23): 8607-8616.
- Poncet, V., Vaast, P. and Allinne, C., 2024. Which diversification trajectories make coffee farming more sustainable? *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 68: 101432.
- Posada, F., Aime, M.C., Peterson, S.W., Rehner, S.A. and Vega, F.E., 2007. Inoculation of coffee plants with the fungal entomopathogen *Beauveria bassiana* (Ascomycota: Hypocreales). *Mycological research*, 111(6): 748-757.
- Power, A.G., 2010. Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 365: 13.
- Prost, L. et al., 2017. Innovative design for agriculture in the move towards sustainability: scientific challenges. *Research in engineering design*, 28(1): 119-129.
- Rabbinge, R. and de Wit, C.T., 1989. Systems, models and simulation. In: R. Rabbinge, S.A. Ward and H.H. Van Laar (Editors), *Simulation and systems management in crop protection*, Wageningen, pp. 420.
- Rabbinge, R. and Rijdsdijk, F., 1982. Disease and crop physiology: a modeller's point of view, *Effects of Disease on the Physiology of the Growing Plant*. CUP, pp. 201-220.
- Rafflegeau, S. et al., 2023. The ESSU concept for designing, modeling and auditing ecosystem service provision in intercropping and agroforestry systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 43(4): 43.
- Ramos, M.J., Beilhe, L.B., Alvarado, J., Rapidel, B. and Allinne, C., 2024. Disentangling shade effects for cacao pest and disease regulation in the Peruvian Amazonia. *Agronomy for Sustainable Development*, 44(1): 11.
- Rao, M., Nair, P. and Ong, C., 1997. Biophysical interactions in tropical agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 38(1): 3-50.
- Rapidel, B., Le Coq, J.F., DeClerck, F. and Beer, J., 2011. Measurement and payment of ecosystem services from agriculture and agroforestry: new insights from the neotropics. In: F. DeClerck, J.F. Le Coq and J. Beer (Editors), *Ecosystem services from agriculture and agroforestry: measurement and payment*. Earthscan, London.
- Rapidel, B. et al., 2015. Analysis of ecosystem services trade-offs to design agroecosystems with perennial crops. *Agronomy for Sustainable Development*: 1-18.

- Ratnadass, A., Fernandes, P., Avelino, J. and Habib, R., 2012. Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(1): 273-303.
- Reymond, M., Muller, B., Leonardi, A., Charcosset, A. and Tardieu, F., 2003. Combining Quantitative Trait Loci Analysis and an Ecophysiological Model to Analyze the Genetic Variability of the Responses of Maize Leaf Growth to Temperature and Water Deficit. *PLANT PHYSIOLOGY*, 131(2): 664-675.
- Ribeyre, F. et al., 2012. Specialty coffee: managing quality. Southeast Asia: IPNI: 151-176.
- Robin, M.-H. et al., 2013. Injury Profile SIMulator, a Qualitative Aggregative Modelling Framework to Predict Injury Profile as a Function of Cropping Practices, and Abiotic and Biotic Environment. II. Proof of Concept: Design of IPSIM-Wheat-Eyespot. *PLoS One*, 8(10): e75829.
- Roupsard, O. et al., 2015. COFFEE-FLUX (Costa Rica) Observatory for monitoring and modeling carbon, nutrients, water and sediment ecosystem services in coffee agroforestry systems; Mitigation and adaptation to climate changes through ecosystem manipulation. s.n., Toulouse, 1 p. pp.
- Saj, S., Jagoret, P., Ngnogue, H.T. and Tixier, P., 2023. Effect of neighbouring perennials on cocoa tree pod production in complex agroforestry systems in Cameroon. *European Journal of Agronomy*, 146: 126810.
- Salazar-Díaz, R. and Tixier, P., 2021. Individual-based analysis of interactions between plants: a statistical modelling approach applied to banana and cacao in heterogeneous multistrata agroecosystems in Talamanca, Costa Rica. *European Journal of Agronomy*, 127: 126295.
- Sanchez, E. et al., 2013. Shade has antagonistic effects on coffee berry borer, 24th International Conference on Coffee Science San José, Costa Rica,, pp. 729-736.
- Sauvadet, M. et al., 2018. Shade trees have higher impact on soil nutrient availability and food web in organic than conventional coffee agroforestry. *Science of The Total Environment*.
- Savary, S., Madden, L.V., Zadoks, J.C. and Klein-Gebbinck, H.W., 1995. Use of categorical information and correspondence analysis in plant disease epidemiology. *Advances in botanical research*, 21: 213-240.
- Savary, S., Mille, B., Rolland, B. and Lucas, P., 2006. Patterns and Management of Crop Multiple Pathosystems. *European Journal of Plant Pathology*, 115(1): 123-138.
- Savary, S., Teng, P., Willocquet, L. and Nutter, F.J., 2006. Quantification and modeling of crop losses: A review of purposes. *Annual Review of Phytopathology*, 44: 89-112.
- Schroth, G., Krauss, U., Gasparotto, L., Duarte Aguilar, J. and Vohland, K., 2000. Pests and diseases in agroforestry systems of the humid tropics. *Agroforestry Systems*, 50(3): 199-241.
- Silva, M.G.d., Pozza, E.A., Monteiro, F.P. and Lima, C.V.R.V.d., 2016. Effect of light and temperature on *Cercospora coffeicola* and *Coffea arabica* pathosystem.
- Soto-Pinto, L., Perfecto, I. and Caballero-Nieto, J., 2002. Shade over coffee: its effects on berry borer, leaf rust and spontaneous herbs in Chiapas, Mexico. *Agroforestry Systems*, 55(1): 37-45.
- Soto-Pinto, L., Perfecto, I., Castillo-Hernandez, J. and Caballero-Nieto, J., 2000. Shade effect on coffee production at the northern Tzeltal zone of the state of Chiapas, Mexico. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 80(1-2): 61-69.
- Souza, R.M., 2008. Plant-parasitic nematodes of coffee. Springer Science & Business Media.
- Souza, R.M. and Bressan-Smith, R., 2008. Coffee-Associated *Meloidogyne spp.* – Ecology and Interaction with Plants. In: S. Netherlands (Editor), *Plant-Parasitic Nematodes of Coffee*, pp. 123-147.
- Staver, C., Guharay, F., Monterroso, D. and Muschler, R., 2001. Designing pest-suppressive multistrata perennial crop systems: shade-grown coffee in Central America. *Agroforestry Systems*, 53(2): 151-170.
- Stevens, E.J., Bates, K.A. and King, K.C., 2021. Host microbiota can facilitate pathogen infection. *PLoS pathogens*, 17(5): e1009514.
- Tancoigne, E., Barbier, M., Cointet, J.-P. and Richard, G., 2014. The place of agricultural sciences in the literature on ecosystem services. *Ecosystem Services*, 10: 35-48.

- Tavares, P.d.S., Giarolla, A., Chou, S.C., Silva, A.J.d.P. and Lyra, A.d.A., 2018. Climate change impact on the potential yield of Arabica coffee in southeast Brazil. *Reg Environ Change*, 18(3): 873-883.
- Tehulie, N.S. and Nigatie, T.Z., 2023. Response of intercropping coffee (*Coffea arabica* L.) with banana (*Musa* spp.) on yield, yield components, and quality of coffee. *Crop Science*, 63(2): 888-898.
- Tilman, D., Wedin, D. and Knops, J., 1996. Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems. *Nature*, 379(6567): 718-720.
- Toffolini, Q., Jeuffroy, M.-H. and Prost, L., 2016. Indicators used by farmers to design agricultural systems: a survey. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(1): 5.
- Toledo, V.M. and Moguel, P., 2012. Coffee and Sustainability: The Multiple Values of Traditional Shaded Coffee. *Journal of Sustainable Agriculture*, 36(3): 353-377.
- Tscharntke, T. et al., 2011. Multifunctional shade-tree management in tropical agroforestry landscapes – a review. *Journal of Applied Ecology*, 48(3): 619-629.
- Uribe, D., Sánchez-Nieves, J. and Vanegas, J., 2010. Role of Microbial Biofertilizers in the Development of a Sustainable Agriculture in the Tropics. In: P. Dion (Editor), *Soil Biology and Agriculture in the Tropics*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 235-250.
- Urruty, N., Tailliez-Lefebvre, D. and Huyghe, C., 2016. Stability, robustness, vulnerability and resilience of agricultural systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(1): 15.
- Urtecho, K., 2005. Elaboración de inóculo microbiológico MM. Feria América Tropical. La sostenibilidad está en tus manos (2005, EARTH). Memorias. EARTH, CR.
- Vaast, P., Bertrand, B., Perriot, J.-J., Guyot, B. and Génard, M., 2006. Fruit thinning and shade improve bean characteristics and beverage quality of coffee (*Coffea arabica* L.) under optimal conditions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(2): 197-204.
- Vaast, P. and Somarriba, E., 2014. Trade-offs between crop intensification and ecosystem services: the role of agroforestry in cocoa cultivation. *Agroforestry systems*, 88: 947-956.
- van Der Meer Simo, A., Kanowski, P. and Barney, K., 2020. The role of agroforestry in swidden transitions: a case study in the context of customary land tenure in Central Lao PDR. *Agroforestry Systems*, 94: 1929-1944.
- van der Vossen, H., Bertrand, B. and Charrier, A., 2015. Next generation variety development for sustainable production of arabica coffee (*Coffea arabica* L.): a review. *Euphytica*, 204(2): 243-256.
- van Ittersum, M.K. et al., 2013. Yield gap analysis with local to global relevance—A review. *Field Crops Research*(0).
- Van Oijen, M., Dauzat, J., Harmand, J.-M., Lawson, G. and Vaast, P., 2010. Coffee agroforestry systems in Central America: II. Development of a simple process-based model and preliminary results. *Agroforestry Systems*.
- Van Oijen, M. et al., 2022. Ecosystem services from coffee agroforestry in Central America: estimation using the CAF2021 model. *Agroforestry Systems*, 96(7): 969-981.
- Vandermeer, J. et al., 2019. The community ecology of herbivore regulation in an agroecosystem: lessons from complex systems. *BioScience*, 69(12): 974-996.
- Vega, D., Gazzano Santos, M.I., Salas-Zapata, W. and Poggio, S.L., 2020. Revising the concept of crop health from an agroecological perspective. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 44(2): 215-237.
- Vega, F.E., Infante, F., Castillo, A. and Jaramillo, J., 2009 The coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Curculionidae): a short review, with recent findings and future research directions *Terrestrial Arthropod Reviews*, 2: 129-147.
- Vezy, R. et al., 2020. DynACof: A process-based model to study growth, yield and ecosystem services of coffee agroforestry systems. *Environmental modelling & software*, 124: 104609.
- Vignola, R. et al., 2022. Ecosystem-Based Practices for Smallholders' Adaptation to Climate Extremes: Evidence of Benefits and Knowledge Gaps in Latin America. *Agronomy*, 12(10): 2535.
- Villain, L., Molina, A., Sierra, S., Decazy, B. and Sarah, J.L., 2000. Effect of grafting and nematicide treatments on damage by the root-lesion nematode *Pratylenchus* spp. on *Coffea arabica* L. in Guatemala. *Nematropica*: 87-100.

- Vinzi, V.E. and Trinchera, L., 2013. Modèles à équations structurelles, approches basées sur les composantes. SAPORTA, G., DROESBEKE, J.-J. & THOMAS-AGNAN, C.(eds.) Modèles à variables latentes et modèles de mélange. Paris: Editions Technip.
- Viquez, C., Roxinia, D., Meneses Sánchez, J.M., Soto Ballester, M. and Quirós, L., 2008. Evaluación de fertilizantes biológicos (bioles) líquidos reforzados aplicados al suelo en el cultivo de banano.
- von Döhren, P. and Haase, D., 2015. Ecosystem disservices research: A review of the state of the art with a focus on cities. *Ecological Indicators*, 52(0): 490-497.
- Wade, A.S. et al., 2010. Management strategies for maximizing carbon storage and tree species diversity in cocoa-growing landscapes. *Agriculture, ecosystems & environment*, 138(3-4): 324-334.
- Waller, J.M., Bigger, M. and R.J. H., 2007. Coffee pests, diseases and their management. Cambridge, MA : CABI Pub, 434 pp.
- Wang, A. and Arauz, L.F., 1999. Aplicación de principios epidemiológicos para el combate de ojo de gallo en cafeto, Memoria" XI Congreso Agronómico/IV Congreso Nacional de Fitopatología. Colegio de Ingenieros Agrónomos, CRI, pp. 9-12.
- Willoquet, L., Savary, S., Fernandez, L., Elazegui, F. and Teng, P., 2000. Development and evaluation of a multiple-pest, production situation specific model to simulate yield losses of rice in tropical Asia. *Ecological Modelling*, 131(2-3): 133-159.
- Zabala, J.A., Martínez-Paz, J.M. and Alcon, F., 2021. A comprehensive approach for agroecosystem services and disservices valuation. *Science of the Total Environment*, 768: 144859.
- Zadoks, J.C. and Schein, R.D., 1979. *Epidemiology and plant disease management.*, New York-Oxford.
- Zewdie, B. et al., 2021. Temporal dynamics and biocontrol potential of a hyperparasite on coffee leaf rust across a landscape in Arabica coffee's native range. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 311: 107297.
- Zhang, W., Ricketts, T.H., Kremen, C., Carney, K. and Swinton, S.M., 2007. Ecosystem services and disservices to agriculture. *Ecological Economics*, 64(2): 253-260.

- ACL23 Ramos M.J., Bagny Beilhe L., Alvarado J., Rapidel B., **Allinne C.** 2024. Disentangling Shade Effects for Cacao Pest and Disease Regulation in the Peruvian Amazonia. *Agronomy for Sustainable Development*, **44**: 11, 17p.  
[doi.org/10.1007/s13593-024-00948-6](https://doi.org/10.1007/s13593-024-00948-6)
- ACL18 Durand-Bessart C., Tixier P., Quinteros A., Andreotti F., Rapidel B., Tauvel C., **Allinne C.** 2020. Analysis of interactions amongst shade trees, coffee foliar diseases and coffee yield in multistrata agroforestry systems. *Crop Protection*, **133** : 105137, 8 p.  
[doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105137](https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105137)
- ACL13 Avelino J., **Allinne C.**, Cerda R., Willocquet L., Savary S. 2018. Multiple-disease system in coffee: From crop loss assessment to sustainable management. *Annual Review of Phytopathology*, **56** : p. 611-635.  
[doi.org/10.1146/annurev-phyto-080417-050117](https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080417-050117)
- ACL10 Cerda R., **Allinne C.**, Gary C., Tixier P., Harvey C.A., Krolczyk L., Mathiot C., Clement E., Aubertot J.N., Avelino J. 2017. Effects of shade, altitude and management on multiple ecosystem services in coffee agroecosystems. *European Journal of Agronomy*, **82** : p. 308-319.  
[doi.org/10.1016/j.eja.2016.09.019](https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.09.019)
- ACL9 Cerda R., Avelino J., Gary C., Tixier P., Lechevallier E., **Allinne C.** 2017. Primary and secondary yield losses caused by pests and diseases: Assessment and modeling in coffee. *PLoS One*, **12** (1) : 17 p.  
[doi.org/10.1371/journal.pone.0169133](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169133)
- ACL7 **Allinne C.**, Savary S., Avelino J. 2016. Delicate balance between pest and disease injuries, yield performance, and other ecosystem services in the complex coffee-based systems of Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **222** : p. 1-12.  
[doi.org/10.1016/j.agee.2016.02.001](https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.02.001)